

1. EKSPERTYZA W ZAKRESIE INWESTYCJI W SPRZĘT BADAWCZY W KRAJOWYCH OŚRODKACH NAUKOWYCH

1.1. Wstęp

Niniejsza ekspertyza została wykonana na zamówienie Instytutu Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy w Warszawie (IFPiLM), który jest koordynatorem projektu „Fore-sight dla Energetyki Termojądrowej” [1]. Projekt ten ma za zadanie opracować strategię jak najszerzego włączenia się polskiej nauki i przemysłu w prace nad energetyką termojądrową. W ramach projektu zaplanowano wykonanie, przez niezależne zespoły eksperckie, sześciu opracowań, wśród których znalazła się niniejsza ekspertyza. IFPiLM formułując zlecenie zauważył, że [2] „... aktualnie nie ma scentralizowanego planu inwestycyjnego w infrastrukturę urządzeń badawczych na potrzeby fizyki termojądrowej. Jest to poważne zaniedbanie, gdyż tego rodzaju sprzęt jest niezwykle drogi, wykraczający poza możliwości pojedynczych ośrodków. Tworzenie wspólnej infrastruktury jest możliwe, niemniej jednak wymaga planu, którego nie ma. Ekspertyza ma doprowadzić do stworzenia wieloletniego, spójnego planu inwestycji w obiekty wielkiej infrastruktury badawczej.”

Należy w tym miejscu zauważyć, że nasze opracowanie nie jest i nie może być uważane za ów „wieloletni, spójny plan inwestycji w obiekty wielkiej infrastruktury badawczej”. Definiuje ono jedynie bieżące i przyszłe, w krótkim horyzoncie czasowym, potrzeby inwestycji w sprzęt badawczy w krajowych ośrodkach naukowych bez wskazania lokalizacji konkretnych inwestycji, niezbędnych nakładów czy harmonogramu. Dlatego też to opracowanie może być jedynie traktowane jako punkt wyjściowy do opracowania wspomnianego przez IFPiLM planu inwestycji.

Od lat pięćdziesiątych ubiegłego wieku naukowcy i inżynierowie na całym świecie pracują, aby urzeczywistnić marzenie o opanowaniu technologii, która w warunkach ziemskich pozwoliłaby na wytwarzanie energii w procesie, jaki zachodzi w Słońcu i innych gwiazdach. Potencjalne korzyści wynikające z opracowania takiej technologii są nie do przecenienia, gdyż dzięki niej moglibyśmy osiąść bezpieczne oraz przyjazne środowisku źródło energii, które w praktyce jest niewyczerpalne, bo oparte na obficie występujących na Ziemi paliwach, do których dostęp nie jest warunkowany położeniem geograficznym. Obecnie po ponad 50 latach badań i prac rozwojowych w tym obszarze, drogi do realizacji celu, jakim jest energetyka termojądrowa stają się coraz bardziej wyraźne. Dziś istnieją dwa główne podejścia do realizacji syntezy termojądrowej w warunkach ziemskich, które pozwalają na myślenie o uzyskiwaniu energii. Podejścia te różnią się od siebie sposobem utrzymywania i podgrzewania plazmy, w której zachodzi reakcja termojądrowa, a są to: magnetyczne utrzymanie plazmy (MCF ang. *Magnetic Confinement Fusion*) oraz inercyjne utrzymanie plazmy (ICF ang. *Inertial Confinement Fusion*). W ramach technologii MCF siedmiu partnerów, w tym m.in.

EU, USA, Japonia i Rosja, podpisało umowę do projektu budowy eksperymentalnego reaktora termojądrowego o mocy 500MW o nazwie ITER [iii]. Urządzenie to budowane w konfiguracji tokamaka ma być ostatnim krokiem na drodze do demonstracyjnej elektrowni termojądrowej. Zgodnie z obecnym planem projektu, ITER ma zostać uruchomiony w 2018 roku, a po 5 latach od tej daty rozpocznie pracę z mieszkanką deuteru i trytu, która w warunkach ziemskich ma pozwolić na uzyskiwanie w procesie syntezy termojądrowej energii netto z reaktora (tzn. stosunek energii wytwarzanej w energii syntezy do energii wykorzystanej do ogrzania i utrzymania plazmy będzie większy od 1). ITER ma wykazać, że urządzenie może wytwarzać 10-krotnie więcej energii niż samo wykorzystuje.

W zakresie technologii ICF został niedawno zakończony w Stanach Zjednoczonych projekt budowy *National Ignition Facility* (NIF) [iv]. W Europie podobny projekt realizowany jest we Francji (LMJ) [v]. W obu tych projektach celem jest uzyskanie energii z niewielkiej „pastylki” paliwowej, która poddawana jest działaniu promieniowania laserowego dużej mocy. W USA pierwsze eksperymenty w tym zakresie planowane są na rok 2010. Ponadto innowacyjne programy badawcze poświęcone temu sposobowi wytwarzania energii w reakcji syntezy termojądrowej prowadzone są w Japonii, a także w Europie (projekt HiPER, *High Power Laser Energy Research facility*) [vi]. Projekty te mają na celu zweryfikowanie potencjalnych korzyści zastosowania laserów petawatowych w technologii „fast ignition”, co pozwoliłoby na zmniejszenie rozmiarów i kosztów systemów laserowych.

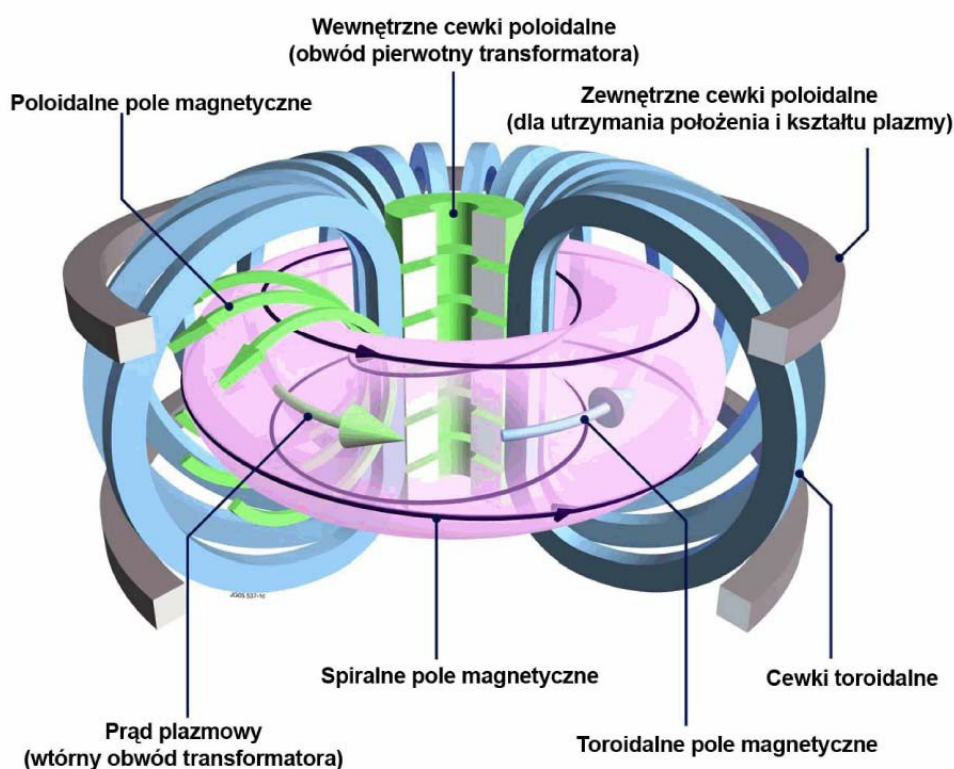
Zarówno w obszarze magnetycznego jak i inercyjnego utrzymania plazmy obecny poziom wiedzy i zaawansowanie technologiczne pozwalają na stwierdzenie, że oba podejścia mogą zakończyć się sukcesem i w efekcie dalszych prac doprowadzić do skonstruowania komercyjnych elektrowni termojądrowych [vii]. Z uwagi jednak na fakt, że Wspólnota Europejska (WE) zaangażowała się bardzo mocno w projekt budowy reaktora ITER (reaktor ten powstanie w południowej Francji, a Europa poniesie znacznie większą część kosztów - 45% w fazie budowy, 34% w fazach użytkowania, dezaktywacji i rozbiórki - niż inni partnerzy konsorcjum) [viii, ix] oraz że zarówno projekt NIF w USA jak i LMJ we Francji oprócz badań nad energetyką termojądrową prowadzić będą działania na rzecz technologii wojskowych związanych z rozwojem broni nuklearnej jak również, że projekt HiPER, którego celem jest zademonstrowanie przydatności technologii ICF do wytwarzania energii znajduje się jeszcze w fazie „studium wykonalności”, zasadnym wydaje się, aby rozwój prac badawczych w Polsce, a w związku z tym również inwestycje infrastrukturalne, uwzględniał większe zaawansowanie technologiczne magnetycznego utrzymania plazmy.

Warto w tym miejscu zauważyć, że takie podejście do problemu przyjął także zespół ekspertów powołany w grudniu 2007 roku przez Komisję Europejską, któremu powierzono wykonanie opracowania poświęconego potrzebom badawczym i niezbędnej infrastrukturze dla rozwoju syntezy termojądrowej, jako źródła energii [x]. W opracowaniu tym międzynarodowy zespół ekspercki wskazał na istniejące potrzeby badawcze w ramach technologii MCF oraz braki w infrastrukturze badawczej. Wnioski przedstawione w tym raporcie zostały uwzględnione przy opracowywaniu niemiejszej ekspertyzy.

1.2. Międzynarodowe infrastruktury badawcze realizujące badania nad energetyką termojądrową

Opisując infrastrukturę wykorzystywaną w badaniach i pracach rozwojowych na rzecz energetyki termojądrowej dobrze jest podzielić ją na trzy grupy. W pierwszej grupie wymienić należy urządzenia wytwarzające plazmę. Urządzenia te mogą służyć zarówno jako maszyny doświadczalne do badań samej plazmy czy sposobów jej kontrolowania jak i eksperymentalne reaktory (jak wspomniany we wstępie ITER), które mają pokazać możliwość uzyskiwania energii z reakcji syntezy. W drugiej grupie znajdują się centra technologiczne, które pozwalają na rozwój urządzeń diagnostycznych oraz na badania komponentów i materiałów wykorzystywanych w budowie urządzeń wytwarzających energię z syntezy termojądrowej. Trzecią stanowią centra obliczeniowe. Najistotniejsze elementy międzynarodowej infrastruktury, ze szczególnym uwzględnieniem tych wykorzystywanych w programie europejskim, z podziałem na te trzy grupy zostały omówione w kolejnych podrozdziałach.

1.2.1. Magnetyczne utrzymanie plazmy

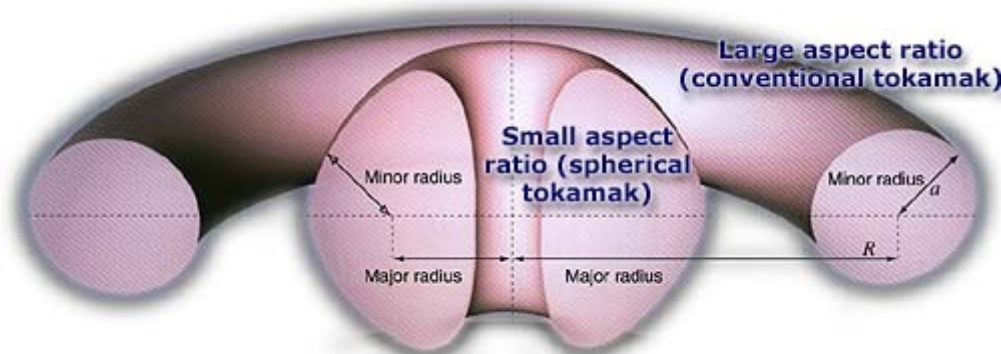


Rys. 1: Układ cewek i pól magnetycznych tokamaka ([http:// www.jet.efda.org](http://www.jet.efda.org)).

Magnetyczne utrzymanie plazmy w praktyce realizowane jest w urządzeniach o różnych konfiguracjach pola magnetycznego. Najpopularniejsze obecnie rozwiązanie to tzw. tokamak, którego nazwa wywodzi się od rosyjskiej nazwy systemu: *Toroidalnaja Kamiera s Magnitnymi Katuszkami* - toroidalna komora z cewkami magnetycznymi. W urządzeniu tym komora, w której wytwarza się plazmę ma kształt torusa i jest wtórnym uzwojeniem transformatora. Ponadto wokół komory znajdują się cewki generujące toroidalne pole magne-

tyczne (patrz Rys. 1). Prąd narastający w uzwojeniu pierwotnym transformatora indukuje napięcie w komorze powodujące przebicie elektryczne gazu, jonizację i w efekcie powstanie plazmy, w której zaczyna płynąć prąd elektryczny o dużym natężeniu (od setek do tysięcy kA). Poloidalne pole magnetyczne pochodzące od prądu płynącego w plazmie razem toroidalnym polem magnetycznym wytworzonym przez zewnętrzne cewki tworzy w efekcie powierzchnie magnetyczne, które są w stanie utrzymać plazmę z dala od ścianek komory. Jednocześnie prąd płynący przez plazmę grzeje ją, co wraz z innymi systemami grzania np. grzanie wiązką neutralnych cząstek (NBI), lub mikrofalami (ICRH) pozwala nagrzwać plazmę do temperatur rzędu dziesiątków milionów stopni. Przepływ prądu w plazmie jest więc niezbędnym elementem potrzebnym do poprawnego funkcjonowania pułapki magnetycznej w tokamaku.

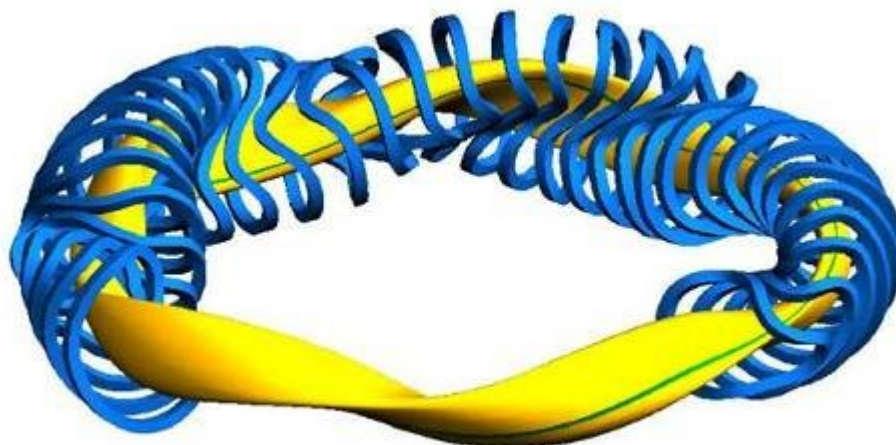
Pewną odmianą klasycznego tokamaka (*large aspect ratio tokamak* – Rys. 2) jest tokamak sferyczny. W urządzeniu tym (*small aspect ratio – spherical tokamak*) stosunek promienia torusa komory (*major radius*) do promienia przekroju komory (*minor radius*) jest bliiski jedności, tak że komora ma w przybliżeniu kształt kuli (mimo, że jest to nadal torus z centralną kolumną w środku).



Rys. 2: Geometria komory konwencjonalnego i sferycznego tokamaka. (<http://www.fusion.org.uk/st/advantages.html#>)

Drugą popularną konfiguracją pułapki magnetycznej jest tzw. stellarator. W konfiguracji tej powierzchnie magnetyczne w komorze, w której wytwarzana jest plazma, są utworzone przez zewnętrzne, odpowiednio rozmieszczone cewki o specyficznym kształcie. Plazma utrzymywana jest przez zewnętrzne pole magnetyczne, a powierzchnie magnetyczne mają specyficzny kształt, niesymetryczny osiowo (patrz Rys. 3). W odróżnieniu od tokamaka urządzenie to charakteryzuje się tym, że nie wymaga wzbudzenia prądu w plazmie dla poprawnego funkcjonowania pułapki magnetycznej, w związku z czym urządzenia tego typu są predysponowane do pracy ciągłej (podczas gdy tokamak charakteryzuje praca pulsacyjna).

Pierwszy stellarator zbudowano w [Princeton Plasma Physics Laboratory](#) w USA w 1951 roku. Na przestrzeni lat opracowano kilka coraz bardziej zaawansowanych konfiguracji: Torsatron, Heliotron, Heliac, Helias.



Rys. 3: Geometria sznura plazmy i cewek magnetycznych w stellaratorze W7-X. (<http://www.ipp.mpg.de/ippcms/eng/for/projekte/w7x/device/magnets/index.html>)

1.2.1.1. Urządzenia wytwarzające plazmę

Przystępując do opisu urządzeń wytwarzających plazmę wykorzystywanych w programie syntezy termojądrowej realizowanym od 60 lat na całym świecie, warto zauważyć, że liczba tych urządzeń zbudowanych i eksploatowanych na przestrzeni lat uniemożliwia opisanie, choćby zdanek, wszystkich z nich w niniejszym opracowaniu (samych tylko tokamaków było ponad 200 [xi], a obecnie eksploatowanych jest ponad 40). Dlatego też, na potrzeby niniejszego opracowania, zostaną krótko omówione jedynie najistotniejsze z punktu widzenia europejskiego programu badawczego urządzenia zidentyfikowane w opracowaniu wykonanym na zlecenie Komisji Europejskiej [x].

JET (Wielka Brytania)



Rys. 4: Centrum badawcze w Culham oraz wnętrze tokamaka JET. (<http://www.jet.efda.org/pages/jet.html>)

Największym działającym obecnie tokamakiem jest JET, *Joint European Torus*, w Wielkiej Brytanii (Rys. 4). Jego budowę prowadziły wspólnie kraje europejskie – rozpoczęła się w 1978 roku, a pierwsze eksperymenty przeprowadzono w roku 1983. Badania prowadzone z użyciem JET prowadzone są przez naukowców z Asocjacji EURATOM z ponad 20 krajów europejskich a koordynuje je EFDA (*European Fusion Development Agreement*). W badaniach tych biorą udział także naukowcy z Polski. Tokamak JET jest przystosowany do pracy z wykorzystaniem samego deuteru jak również deuteru i trytu, co jest

unikalną cechą tego urządzenia w porównaniu do innych obecnie pracujących. JET osiągnął rekordową moc syntezy termojądrowej – 16 MW.

W ciągu najbliższych dwóch lat urządzenie zostanie istotnie zmodernizowane tak, aby optymalnie wesprzeć budowę i eksploatację reaktora ITER. Warto w tym miejscu wspomnieć, że JET, wraz z budowanym w Japonii przy współudziale Wspólnoty Europejskiej urządzeniem JT-60SA, stanowią tzw. urządzenia satelitarne dla ITER-a. W urządzeniach tych planowane jest prowadzenie eksperymentów w warunkach pracy, które bezpośrednio będzie można przełożyć na warunki pracy reaktora ITER, a także kolejnego urządzenia na drodze do komercyjnego wytwarzania energii w tokamakach, demonstracyjnego reaktora DEMO. Testowane będą w nich także niektóre rozwiązania techniczne i komponenty opracowywane specjalnie dla DEMO, które ze względu na ograniczenia finansowe i czasowe nie będą mogły być testowane w reaktorze ITER. W tabeli poniżej (Tabela 1) podano główne parametry charakteryzujące tokamak JET.

Tabela 1: Parametry tokamaka JET

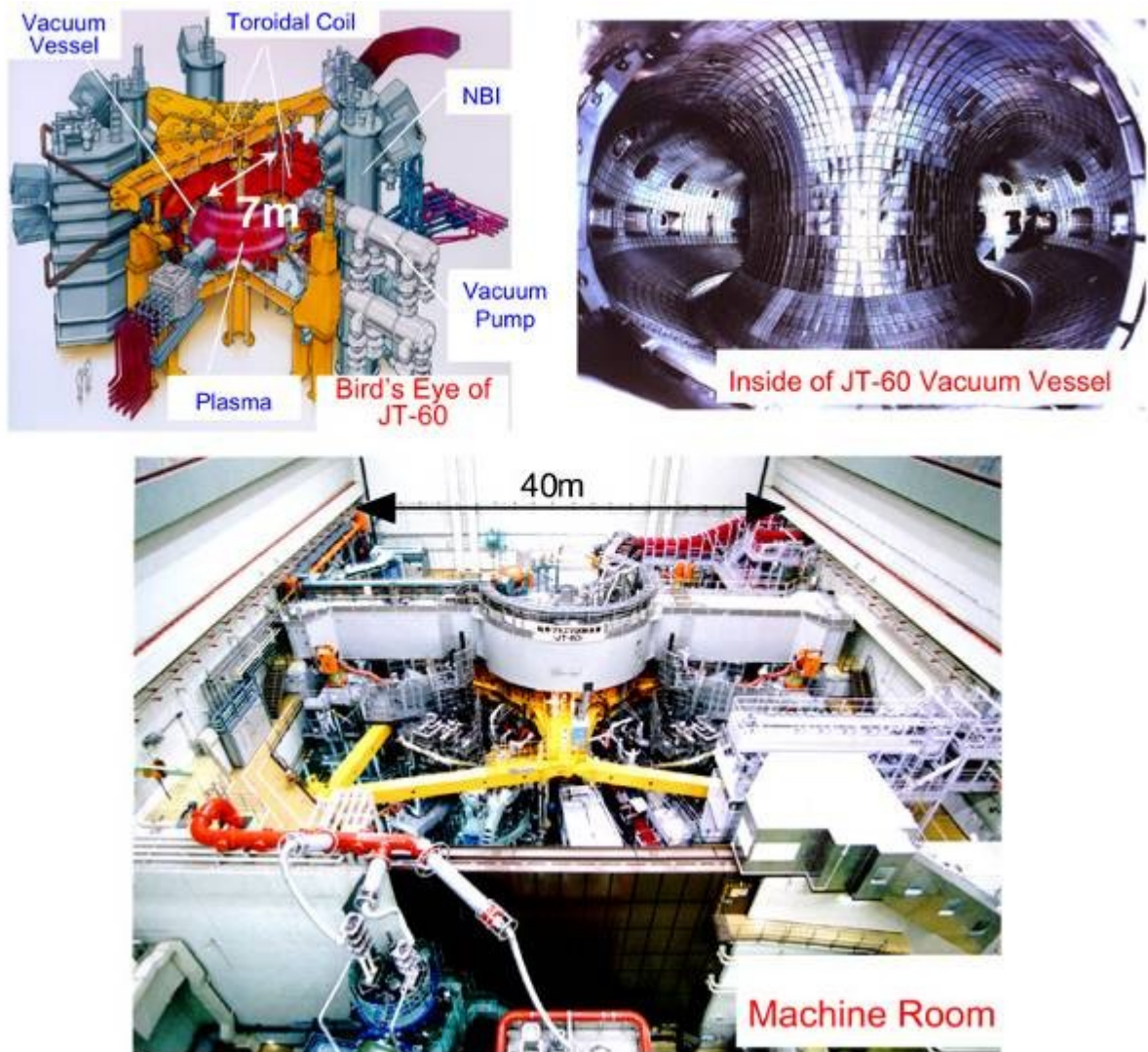
Typ	I_{plazmowy} (MA)	$B_{\text{toroidalne}}$ (T)	R (m)	a (m)	V (m ³)	P (MW)
Tokamak / divertor	4,5	3,5	2,98	1,25	~80	~40

JT-60 (Japonia)

Budowę tego tokamaka rozpoczęto w Japonii w 1976 roku i po 9 latach (tj. w roku 1985) urządzenie oddano do użytku. Od tego momentu prowadzone były w nim prace badawcze i rozwojowe, których wyniki mogą być wykorzystane w projektach ITER i DEMO. W ramach podpisanego porozumienia pomiędzy UE a Japonią (tzw. *Broader Approach*) JT-60 poddany zostanie modernizacji i w 2016 roku zacznie działać jako urządzenie satelitarne dla ITER-a - JT-60SA. Rys. 5 przedstawia poglądowy schemat urządzenia, wewnątrz komory oraz pomieszczenie reaktora. W Tabeli 2 podano parametry planowanego zmodernizowanego urządzenia. Po modyfikacji JT-60SA będzie między innymi wyposażony w nadprzewodzące cewki magnetyczne.

Tabela 2: Parametry tokamaka JT-60SA

Typ	I_{plazmowy} (MA)	$B_{\text{toroidalne}}$ (T)	R (m)	a (m)	V (m ³)	P (MW)
Tokamak / divertor	5,5	2,3	2,95	1,1	~140	~41



Rys. 5: Tokamak JT-60. (<http://www-jt60.naka.jaea.go.jp/english/index-e.html>)

TORE SUPRA (Francja)



Rys. 6: Wnętrze komory tokamaka Tore Supra.
(<http://www-fusion-magnetique.cea.fr/gb/cea/ts/ts.htm>)

Tore Supra (Rys. 6) należy również do grona dużych, obecnie pracujących tokamaków. Głównymi cechami odróżniającymi go od JET-a i JT-60 jest fakt, że urządzenie to wyposażone jest w nadprzewodzące toroidalne cewki magnetyczne oraz aktywnie chłodzoną ścianę komory (oba te rozwiązania będą zastosowane w reaktorze ITER i DEMO). Ponadto czasy utrzymania plazmy w Tore Supra są znacznie dłuższe niż w przypadku dwóch poprzednich urządzeń (do 360 s). Różni się także od nich okrągłym przekrojem sznura plazmowego oraz brakiem *divertora*. Z tego powodu eksperymenty prowadzone w Tore Supra nie mogą być bezpośrednio transponowane na warunki pracy planowane dla przyszłych elektrowni termojądrowych, które projektowane są w konfiguracji z *divertorem* i plazmą o zdecydowanie innym przekroju (zbliżonym do litery D). Parametry Tore Supra podaje Tabela 3.

Tabela 3: Parametry tokamaka Tore Supra

Typ	I_{plazmowy} (MA)	$B_{\text{toroidalne}}$ (T)	R (m)	a (m)	V (m ³)	P (MW)
Tokamak / limiter	2	4,2	2,4	0,75	~25	~20

ASDEX-U (Niemcy)



Rys. 7: Wnętrze komory tokamaka ASDEX-U.

<http://www.ipp.mpg.de/ippcms/eng/for/projekte/asdex/index.html>

ASDEX Upgrade w porównaniu z wcześniej omówionymi urządzeniami i wśród innych obecnie eksploatowanych tokamaków zaliczany jest do urządzeń średniej skali. Jego eksploatacja rozpoczęła się w 1990 roku, jako sukcesora urządzenia ASDEX eksploatowanego w latach 1980-1990. Kształt sznura plazmy w ASDEX-U jest bardzo bliski tym z JET-a i budowanego ITER-a. Cechą wyróżniającą ASDEX-U od innych urządzeń jest fakt, że komora próżniowa w całości pokryta jest wolframem (warto przy okazji zauważyć, że płyty pierwszej ścianki komory wytworzone są z grafitu bądź kompozytów węgiel-węgiel, na które nałożono przy zastosowaniu różnych technik powłoki wolframowe o różnej grubości) – materiałem, który uważany jest za odpowiedni do budowy komór w DEMO i przyszłych reaktorów termojądrowych. Umożliwia to prowadzenie badań nad oddziaływaniem plazma-ściana w urządzeniu „całkowicie wolframowym” (ang. *full tungsten machine*). Ponadto urządzenie wyposażone jest we wszystkie rodzaje systemów grzejących plazmę, jakie będą wykorzysty-

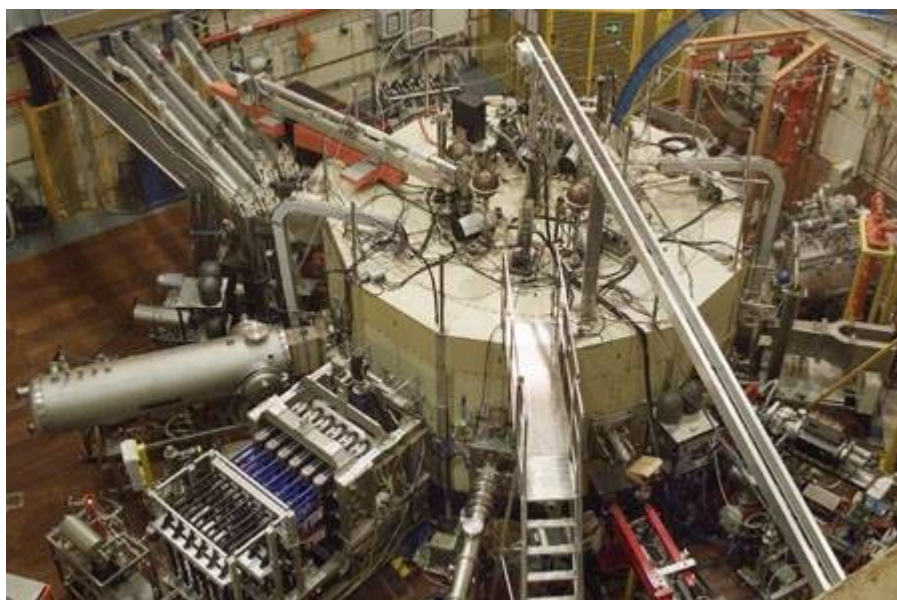
wane w reaktorze ITER i DEMO. Parametry ASDEX-U podane są w Tabeli 4. Rys. 7 pokazuje wnętrze komory tego tokamaka.

Tabela 4: Parametry ASDEX-U

Typ	I_{plazmowy} (MA)	$B_{\text{toroidalne}}$ (T)	R (m)	a (m)	V (m ³)	P (MW)
Tokamak / <i>divertor</i>	1,6	3,1	1,65	0,4	~14	~30

FTU (Włochy)

FTU podobnie jak ASDEX-U jest urządzeniem średniej wielkości. Konfiguracją przypomina Tore Supra (również jest urządzeniem, w którym plazma ma przekrój okrągły i wyposażony jest w *limiter* zamiast *divertora*) jest jednak od niego mniejszy. Jego cechami charakterystycznymi są silne pole magnetyczne, 8 T, oraz podobnie jak w ASDEX-U w pełni metaliczna komora. Tu jednak w odróżnieniu od ASDEX-U zastosowano molibden. Parametry urządzenia podaje Tabela 5. Rys. 8 przedstawia widok ogólny tokamaka FTU.



Rys. 8: Widok na tokamak FTU. <http://www.fusione.enea.it/FTU/index.html.en>

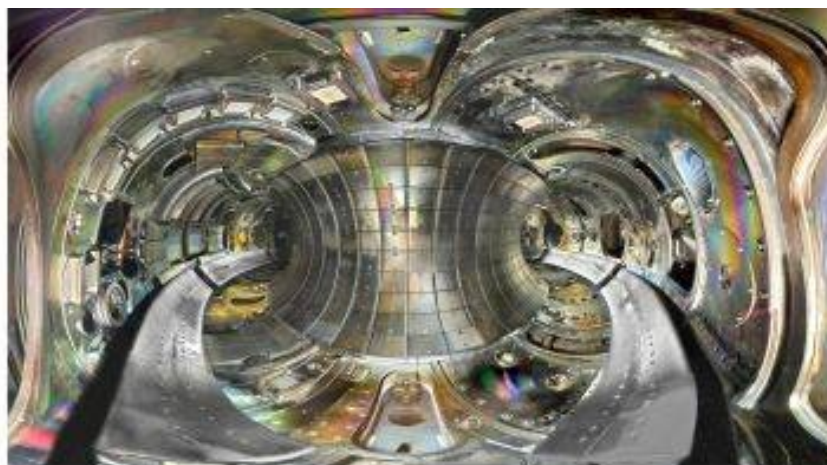
Tabela 5: Parametry tokamaka FTU

Typ	I_{plazmowy} (MA)	$B_{\text{toroidalne}}$ (T)	R (m)	a (m)	V (m ³)	P (MW)
Tokamak / limiter	1,6	8	0,93	0,43	~1,7	~4,1

TEXTOR (Niemcy)

Tokamak TEXTOR i prowadzone w nim eksperymenty zorientowane są na badanie oddziaływań ściana - plazma. Podobnie jak Tore Supra i FTU sznur plazmy ma w nim przekrój kołowy. Wyposażony jest w unikalne dla obecnie eksploatowanych tokamaków rozwiązania pozwalające na „wstrzykiwanie” różnych gazów do komory, grzanie i aktywne chłodze-

nie ścian komory próżniowej oraz płaszcza, wymianę elementów płaszcza jak również umieszczanie dużych próbek (do 15 cm średnicy) w ścianie. Warto zauważyć, że wymiana próbek może odbywać się bez potrzeby zapowietrzania komory urządzenia dzięki zastosowaniu odpowiednich śluz próżniowych. W urządzeniu tym można wytwarzać ekstremalne strumienie energii (ok. 200 MW/m²), które oddziałują z materiałem ściany. Urządzenie jest także wyposażone w unikalne rozwiązanie, jakim jest tzw. *Dynamic Ergodic Divertor* (poza *limitem* stosowanym w tokamakach o kołowym przekroju plazmy) dzięki któremu można wpływać na parametry transportu i badać stabilność na krawędzi plazmy. Rys. 9 pokazuje wnętrze tokamaka TEXTOR. Tabela 6 podaje jego parametry.



Rys. 9: Wnętrze komory tokamaka TEXTOR.
http://www.fz-juelich.de/ief/ief-4/textor_en/#

Tabela 6: Parametry tokamaka TEXTOR

Typ	I _{plazmowy} (MA)	B _{toroidalne} (T)	R (m)	a (m)	V (m ³)	P (MW)
Tokamak/ <i>limiter</i> /DED	0,8	3,0	1,75	0,47	7,0	9

TCV (Szwajcaria)

TCV jest tokamakiem eksploatowanym od 1992 roku w Lozannie przez *Federal Institute of Technology*. Jego konstrukcja pozwala na silne modelowanie i uzyskiwanie przekrojów plazmy o dużym stosunku średnicy pionowej do poziomej. Parametry kształtu plazmy mają istotny wpływ zarówno na stabilność magnetohydrodynamiczną i utrzymanie plazmy w pułapce magnetycznej. Wnętrze komory wykonane jest jak w większości tokamaków z płyt węglowych. Rys. 10 i Tabela 7 prezentują odpowiednio wnętrze komory TCV oraz jego parametry.



Rys. 10: Wnętrze komory tokamaka TCV.

<http://hsi.web.cern.ch/hsi/s-link/projects/tcv/http://crppwww.epfl.ch/tcv/>

Tabela 7: Parametry tokamaka TCV

Typ	I_{plazmowy} (MA)	$B_{\text{toroidalne}}$ (T)	R (m)	a (m)	V (m ³)	P (MW)
Tokamak/limiter/DED	1,02	1,52	0,88	0,25/0,7	1,3-3	4,5

DIII-D (USA)

Tokamak DIII-D jest eksploatowany przez *General Atomics* w San Diego i jest największym urządzeniem tego typu w USA. Sznur plazmy w DIII-D ma przekrój niekołowy a samo urządzenie wyposażone jest w systemy pozwalające na sterowanie kształtem plazmy w szerokim zakresie. Na przestrzeni ostatnich lat DIII-D dostarczał bardzo cennych wyników z obszaru turbulencji w plazmie, transportu energii, fizyki warstwy brzegowej plazmy czy grzania plazmy metodą ECRH. Tabela 8 przedstawia podstawowe parametry tokamaka DIII-D.

Tabela 8: Parametry tokamaka DIII-D

Typ	I_{plazmowy} (MA)	$B_{\text{toroidalne}}$ (T)	R (m)	a (m)	V (m ³)	P (MW)
Tokamak / <i>divertor</i>	1,25	2,0	1,63	0,55	-	-

EAST (Chiny)

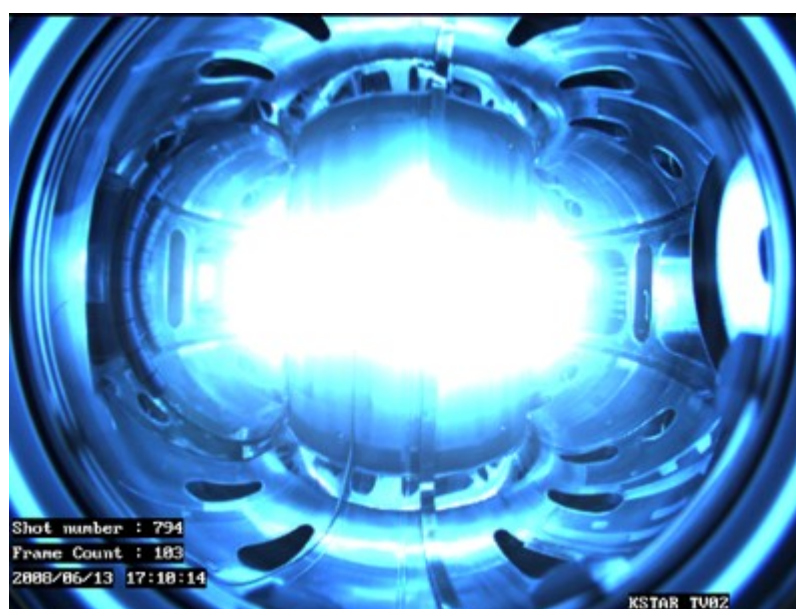
Tokamak EAST jest eksploatowany w Hefei w Chinach od 2006 roku. Jest on unowocześnioną wersją eksploatowanego wcześniej HT-7. Jako pierwsze urządzenie na świecie ma być wyposażony zarówno w poloidalne jak i toroidalne cewki nadprzewodzące. Parametry tokamaka EAST podaje Tabela 9.

Tabela 9: Parametry tokamaka EAST

Typ	I_{plazmowy} (MA)	$B_{\text{toroidalne}}$ (T)	R (m)	a (m)	V (m ³)	P (MW)
Tokamak/limiter/divertor	0,5	3,5	1,7	0,4	-	-

KSTAR (Korea Południowa)

KSTAR jest najnowszym tokamakiem zbudowanym na świecie. Eksploatowany jest od 2008 roku w *National Fusion Research Institute* w Daejon. Jest wyposażony w komplet cewek nadprzewodzących zbudowanych z tego samego materiału, który ma być zastosowany w cewkach ITER-a (Nb3Sn). Obecnie urządzenie może pracować z wyładowaniami trwającymi do 20 s, natomiast już w 2011 roku planowana jest jego rozbudowa, która pozwoli na pracę z długimi impulsami do 300 s. W odróżnieniu od ITER-a, w KSTAR nie planuje się pracy z trytem. Parametry urządzenia podaje Tabela 10, natomiast na Rys. 11 pokazano pierwsze udane eksperymenty z wyładowaniem plazmowym w KSTAR.



Rys. 11: Wnętrze komory KSTAR z wyładowaniem plazmowym.
http://fire.pppl.gov/KSTAR_First_Plasma_Photos.png

Tabela 10: Parametry tokamaka KSTAR

Typ	I_{plazmowy} (MA)	$B_{\text{toroidalne}}$ (T)	R (m)	a (m)	V (m ³)	P (MW)
Tokamak/divertor	2,0	3,5	1,8	0,5	17,8	-

MAST (Wielka Brytania)

MAST w odróżnieniu od poprzednio omawianych urządzeń jest tokamakiem sferycznym. Urządzenie działa w Culham od 1999 roku. Ze względu na znacznie mniejszy współczynnik kształtu komory, właściwości plazmy generowanej w tym urządzeniu są znacząco odmienne od tych panujących w tradycyjnym tokamaku. Podczas gdy w tradycyjnym tokamaku pole magnetyczne toroidalne jest ok. 10-krotnie większe niż pole poloidalne, to w tokama-

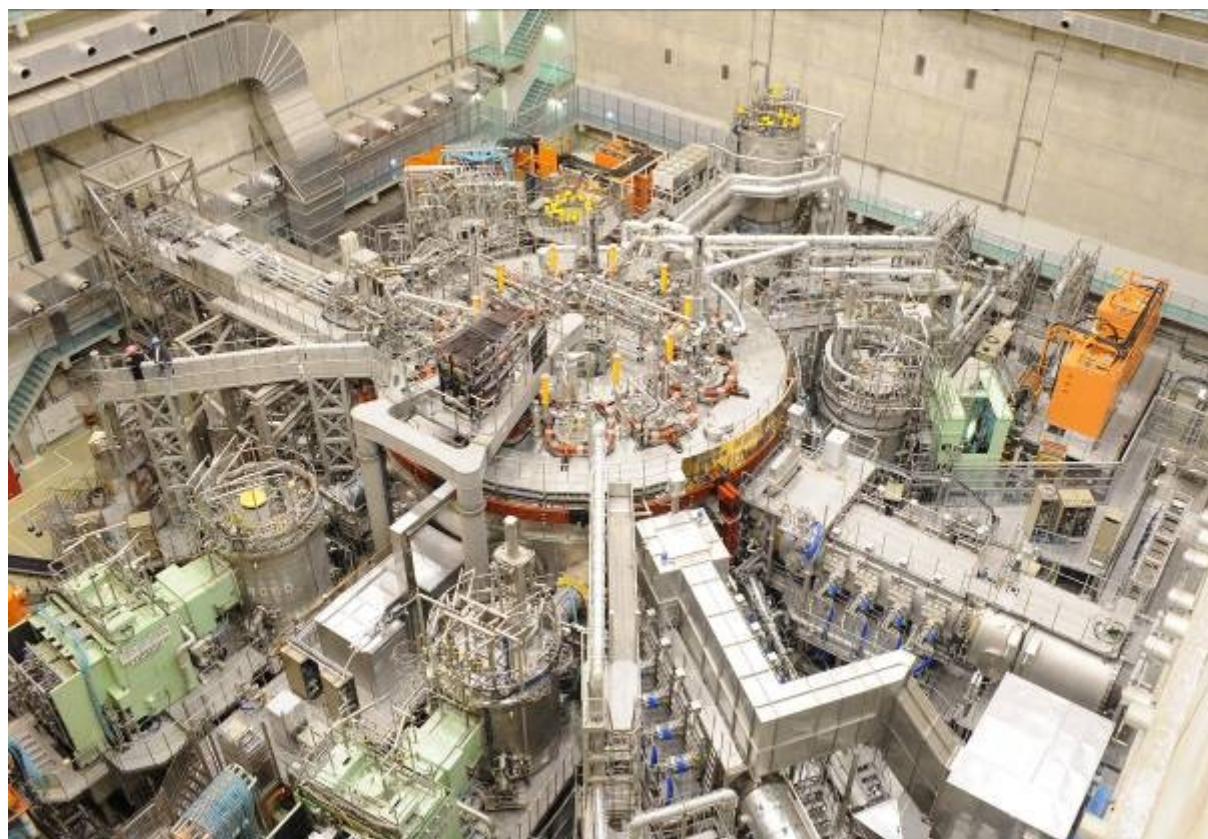
ku sferycznym są one prawie jednakowe. W tej konfiguracji można uzyskiwać znacznie większe stosunki ciśnienia plazmy do ciśnienia pola magnetycznego. W porównaniu do konfiguracji stosowanych w tradycyjnych tokamakach czy stellaratorach wartości tego ilorazu są od 3 do 10 razy wyższe. Geometria urządzenia prowadzi także do znacznie mniejszych efektywnych powierzchni *divertora* narażonych na bardzo duże strumienie energii, co stwarza poważne problemy techniczne przy długotrwałym wyładowaniu plazmowym. przedstawia parametry sferycznego tokamaka MAST.

Tabela 11: Parametry tokamaka MAST

Typ	I_{plazmowy} (MA)	$B_{\text{toroidalne}}$ (T)	R (m)	a (m)	V (m ³)	P (MW)
Tokamak sferyczny	1,4	0,52	0,85	0,65	10	5,4

LHD (Japonia)

LHD jest stellaratorem o konfiguracji heliotronu eksploatowanym od 1998 roku w *National Institute for Fusion Science* Toki, Gifu w Japonii. Jest to urządzenie wyposażone w 2 nadprzewodzące cewki o kształcie helisy i 6 nadprzewodzących cewek poloidalnych. Prowadzone badania mają na celu analizę magnetycznego utrzymania plazmy w warunkach ciągłej pracy urządzenia. Do grzania plazmy w LHD wykorzystuje się wiązkę cząstek neutralnych, fale radiowe o częstotliwości równej jonowej częstotliwości cyklotronowej (ICRH) oraz elektronowej częstotliwości cyklotronowej (ECRH), stosowane także w konwencjonalnych tokamakach. Parametry LHD podaje Tabela 12. Rysunek 12 przedstawia pomieszczenie stellaratora LHD wraz z samym urządzeniem.



Rys. 12: Stellarator LHD – widok ogólny. <http://www.lhd.nifs.ac.jp/en/lhd/>

Tabela 12: Parametry stellaratora LHD

Typ	I_{plazmowy} (MA)	$B_{\text{toroidalne}}$ (T)	R (m)	a (m)	V (m ³)	P (MW)
Stellarator / heliotron	-	3,0 / 4,0	3,5	0,6	-	-

WENDELSTEIN 7-X (Niemcy)

Urządzenie jest budowane w północno-wschodnich Niemczech. Oddanie do użytku planowane jest na 2014 rok. Jest urządzeniem, które zaprojektowano korzystając z doświadczeń zdobytych na poprzedniku niemieckim W7-AS, a także w oparciu o wyniki uzyskiwane w LHD (ze względu na inną konfigurację cewek, tylko częściowo). Urządzenie wyposażone będzie w 5 modułów nadprzewodzących cewek i będzie pracować w układzie helisy. Magnesy W7-X pozwalają na znaczną elastyczność w kształtowaniu plazmy w urządzeniu i przewidyuje się, że w 2019 roku (tj. w drugiej fazie eksploatacji reaktora) będzie ono zdolne do pracy z długimi wysokoenergetycznymi wyładowaniami plazmy przy zastosowaniu aktywnie chłodzonego *divertora* i wszystkich elementów we wnętrzu komory.

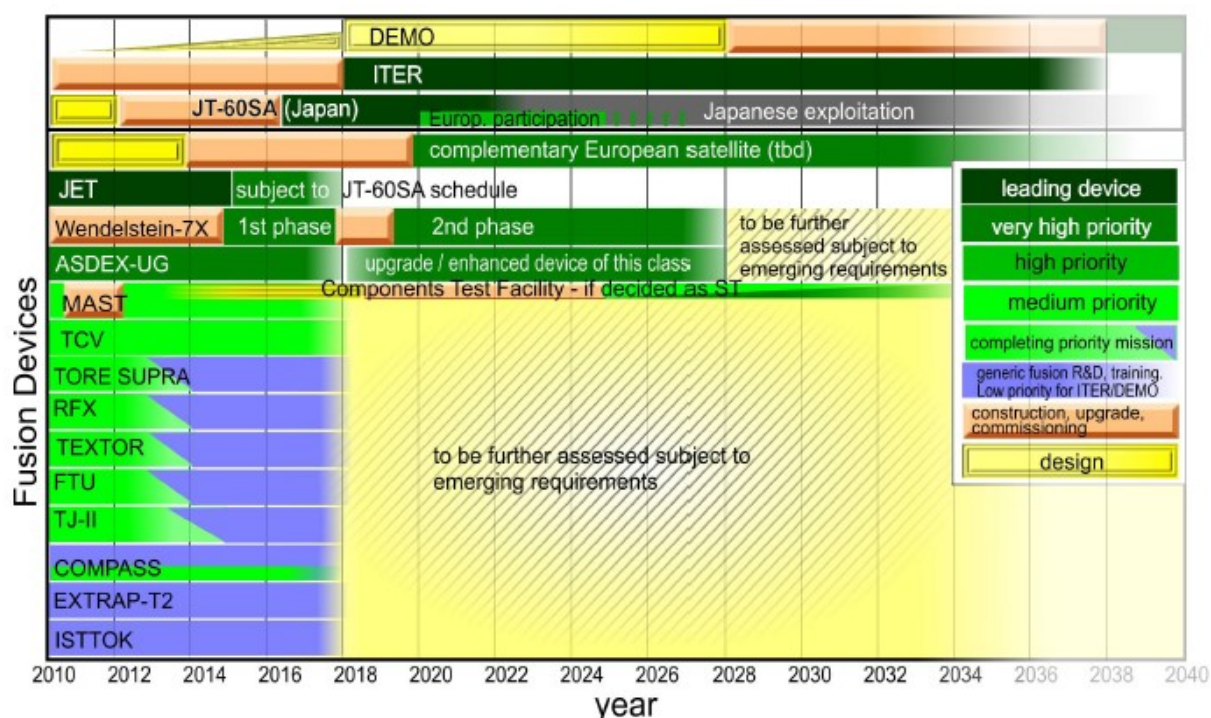
Warto zauważyć, że W7-X budowany jest przy współudziale naukowców i inżynierów z Polski. Badania prowadzone na W7-X mają być decydującym elementem odpowiedzi na pytanie, czy przyszła elektrownia termojądrowa powinna być oparta o koncepcję stellaratora czy też tokamaka. Parametry konstruowanego urządzenia podaje Tabela 13.

Tabela 13: Parametry stellaratora W7-X

Typ	I_{plazmowy} (MA)	$B_{\text{toroidalne}}$ (T)	R (m)	a (m)	V (m ³)	P (MW)
Stellarator / helias	-	3,0	5,5	0,53	30	20 / 33

Na zakończenie tego dość skrótowego przedstawienia urządzeń wytwarzających plazmę w technologii magnetycznego utrzymania plazmy, poniżej przedstawiono tabelę (Rys. 13), którą zaczerpnięto z opracowania przygotowanego na zlecenie KE [x]. W tabeli tej przedstawiono schematycznie hierarchię urządzeń pracujących w Europie pod kątem ich wykorzystania w europejskim programie badań realizowanych dla urzeczywistnienia zastosowania syntezy termojądrowej do wytwarzania energii.

Jak wynika z tabeli z Rys. 13, większość urządzeń obecnie wykorzystywanych będzie miała istotne znaczenie dla programu jedynie do momentu uruchomienia ITER-a, tj. do 2018 roku. Po tej dacie jedynie JT-60SA, ASDEX-U, W7-X i ewentualnie MAST mogą dostarczać informacji cennych z punktu widzenia rozwoju energetyki termojądrowej. Planuje się, że większość odpowiedzi na brakujące pytania uzyskane zostanie w trakcie eksploatacji reaktora ITER.



Rys. 13: Europejskie urządzenia fuzyjne w programie badań nad energią termojądrową. Źródło [x]

1.2.1.2 Centra technologiczne, ośrodki obliczeniowe

Wśród centrów technologicznych realizujących prace na rzecz programu rozwoju energetyki termojądrowej znajdują się ośrodki wytwarzające i testujące materiały, prototypy i podzespoły dla przyszłych reaktorów tj. ITER-a, prowadzące napromieniowanie materiałów i komponentów wiązkami neutronów i wysokoenergetycznymi wiązkami jonów czy elektronów, a także ośrodki zajmujące się prowadzeniem obliczeń i symulacji zjawisk oraz zachowania się materiałów i podzespołów w warunkach pracy elektrowni termojądrowej. Jest to zakres prac niezwykle szeroki i prowadzony przez liczne laboratoria, w związku z czym opisanie choćby zdwkowe istniejącej w programie infrastruktury związanej z centrami technologicznymi znacznie przekracza ramy niniejszego opracowania.

W przytaczanym już wielokrotnie opracowaniu wykonanym na zlecenie Komisji Europejskiej [x] autorzy przedstawili dwie tabele (*Table II.1. Technology facilities for ITER R&D and testing* oraz *Table II.2. Technology facilities for DEMO oriented R&D and testing*), w których dokonano przeglądu infrastruktury wykorzystywanej w europejskim programie badań nad syntezą termojądrową. W tabelach tych zidentyfikowano jednocześnie te obszary badań, w których infrastruktura jest niewystarczająca do zaspokojenia potrzeb badawczych. Ze względu na fakt, że niniejsze opracowanie ma wskazać potrzeby inwestycji w infrastrukturę badawczą w Polsce, logicznym wydaje się, że inwestycje te powinny odbywać się w obszarach, gdzie występują owe braki w Europie. Zidentyfikowane obszary o niedostatecznie rozwiniętej infrastrukturze w Europie to:

1. testy cewek nadprzewodzących,
2. badania wiązkami wysokoenergetycznymi elementów z berylu,
3. grzanie plazmy metodą NBI (*neutral beam injection*),
4. symulatory oddziaływań plazma – ściana,
5. charakteryzowanie materiałów nienapromieniowanych,
6. badania materiałów po napromieniowaniu (aktywnych),

7. napromieniowywanie neutronami o energii i strumieniach porównywalnych z tymi z DEMO,
8. badania cyklu paliwowego z wykorzystaniem trytu.

Ad. 1

W Europie istnieje kilka ośrodków wyposażonych w aparaturę do badania parametrów kabli i cewek nadprzewodzących i uczestniczących w programie syntezy termojądrowej. Są to m.in. CRPP (*Centre de Recherches en Physique des Plasmas*) w Szwajcarii eksploatujący urządzenie SULTAN (<http://crppsc.web.psi.ch/Facilities/facilities.html>) opracowane w latach 70-tych ubiegłego stulecia oraz FZK w Niemczech – operator od początku lat 80-tych XX wieku urządzenia TOSKA (http://www.ipe.fzk.de/projekt/toska/e_index.html). Ponadto w CRPP planuje się uruchomienie w 2010 roku urządzenia EDIPO (*European Dipol*), które znacznie zwiększy możliwości badawcze tego ośrodka. Mimo to istniejąca infrastruktura jest niewystarczająca, bo urządzenia obecnie eksploatowane są zbyt małe, aby przeprowadzić testy na kompletnych cewkach nadprzewodzących, które mają być zastosowane w reaktorze ITER.

Ad. 2

Szereg laboratoriów wyposażonych jest w urządzenia, które mogą oddziaływać wysokoenergetycznymi wiązkami jonów lub elektronów na materiały i podzespoły i w ten sposób prowadzić testy ich zachowania się w warunkach obciążenia dużymi strumieniami ciepła. Wśród tych najczęściej wykorzystywanych w programie znajdują się niemieckie urządzenia GLADIS – akcelerator jonów pracujący w Instytucie Fizyki Plazmy w Garching pod Monachium (<http://www.ipp.mpg.de/ippcms/eng/for/bereiche/material/projekte/msc/7gladis.html>), JUDITH I/II – działa elektronowe użytkowane przez Centrum Badawcze w Juelich (http://www.fz-juelich.de/ief/ief-2/fusion_materials/experimental_devices/electron_beam) oraz ETA-BETA – urządzenie *Reversed Field Pinch* (RFP) we Włoszech (ENEA) (http://www.igi.pd.cnr.it/wwwexp/rfp_history/5hystory.html) i BESTH w Instytucie Badań Jądrowych w Rez w Republice Czeskiej (IPP-CR). Wszystkie one mogą pracować z berylem jednak ich możliwości badawcze są zbyt małe dla planowanych testów seryjnych komponentów dla ITER-a. W opinii ekspertów europejskich konieczne jest uruchomienie w Europie urządzenia, które będzie dedykowane do tego rodzaju testów.

Ad. 3

Obecnie brak jest w Europie infrastruktury, która pozwalałaby na testowanie systemów grzania plazmy metodą wstrzykiwania wiązki cząstek neutralnych (NBI). Doświadczenie w tym zakresie pochodzi z eksperymentów przeprowadzanych w JET, ASDEX-U i Tore Supra, jednak były to próby prowadzone przy niższych mocach niż te wymagane dla ITER-a czy DEMO. Rozwiązaniem tego problemu ma być powstające w Padwie we Włoszech laboratorium NBTF (*Neutral Beam Test Facility*) [xii], które będzie prowadziło badania dwóch prototypowych układów NBI. Układy takie działają na zasadzie akceleratora jonów, które po przyspieszeniu poddaje się neutralizacji poprzez oddziaływanie z gazem złożonym z atomów przyspieszanych jonów. Laboratorium we Włoszech wyposażone będzie w 1 MV akcelerator jonów H lub D. Po zneutralizowaniu wiązka cząstek o energii 1 MeV będzie zawierała ok. 60% cząstek neutralnych i po ok. 20% jonów dodatnich i ujemnych. Następnie wiązka zostanie „oczyszczona” z jonów poprzez przepuszczenie jej przez pole magnetyczne lub elektrostatyczne powodujące odchylenie torów cząstek naładowanych.

Ad. 4

Podstawowymi urządzeniami, w których prowadzone są badania nad oddziaływaniem plazmy na materiał ściany są same tokamaki. W JET realizowany będzie program ILW (*ITER Like Wall*), który pozwoli na ocenę zachowania się materiałów i technologii, które zostaną zastosowane w reaktorze ITER, w warunkach wyładowań plazmowych o podobnym charakterze. Badania z zakresu oddziaływań plazma – ściana prowadzone są także w innych tokamakach, jak na przykład ASDEX-U czy TEXTOR. Ponadto w europejskim programie wykorzystuje się szereg innych urządzeń, które umożliwiają badania wpływu plazmy na materiały. Przykładem może być urządzenie Pilot – PSI eksploatowane w Holandii. Urządzenie to jest plazmotronem, który wykorzystuje plazmę wodorową o temperaturze ok. 15000 °C, przyspieszaną i formowaną w polu elektromagnetycznym, która następnie oddziałuje na tarcze z badanego materiału. Warto zauważyć, że w Holandii budowane jest kolejne urządzenie tego typu – Magnum-PSI, w którym będzie można przeprowadzać badania w warunkach zbliżonych do tych panujących w tokamaku ITER. Urządzenia spełniające podobne zadania znajdują się także m.in. w Belgii (VISION), Niemczech (GLADIS) czy na Słowenii.

Ad. 5

Właściwie każde laboratorium zajmujące się badaniem materiałów wyposażone jest w urządzenia umożliwiające badania właściwości mechanicznych. Infrastruktura taka istnieje także w szeregu ośrodkach przemysłowych zaangażowanych w program rozwoju energetyki termojądrowej. Gorzej natomiast jest z infrastrukturą umożliwiającą badania struktury i składu chemicznego/fazowego materiałów. Szczególnie infrastruktura umożliwiająca badania na miniaturowych próbkach i w nano-obszarach nie jest powszechnie dostępna.

Ad.6

Uwagi podane w poprzednim punkcie odnoszą się w zasadzie także i do badania materiałów napromieniowanych. Istnieje ograniczona liczba ośrodków, które dysponują tzw. gorącymi komorami, gdzie mogą być prowadzone badania próbek napromieniowanych. Podobnie jednak jak poprzednio, braki obserwuje się w infrastrukturze umożliwiającej badania mikrostruktury tych materiałów, a mniejsze ograniczenia - jeśli chodzi o badania właściwości mechanicznych.

Ad. 7

W reaktorze ITER i tym bardziej DEMO, w trakcie ich pracy, materiały będą poddane promieniowaniu neutronów o energii 14 MeV i dużej intensywności. Obecnie w programie europejskim nie ma infrastruktury, która pozwalałaby na uzyskiwanie wiązek neutronów o charakterystyce potrzebnej do prowadzenia miarodajnych badań zachowania się materiałów w warunkach panujących w reaktorze ITER czy DEMO. Rozwiązaniem tego problemu ma być budowa centrum IFMIF (*International Fusion Materials Irradiation Facility*), które powstanie w Japonii. Budowa tego centrum jest współfinansowana przez Unię Europejską. Niestety projektowane urządzenie pozwoli na napromieniowanie próbek materiałów o ograniczonej objętości, dlatego też wspomniane wcześniej badania prowadzone na próbkach miniaturowych mają szczególne znaczenie dla możliwości pełnej oceny właściwości i struktury materiałów napromieniowanych w IFMIF.

Ad. 8

Obecnie w programie europejskim zidentyfikowano dwa laboratoria, które mogą prowadzić badania cyklu paliwowego reaktora, w którym wykorzystywany jest tryt. Oba te laboratoria znajdują się w Niemczech. Są to *Institute for Technical Physics* (ITP), Laboratorium

Trytowe w Karlsruhe oraz *Materials Research Institute*, Laboratorium Materiałów Fuzyjnych również w Karlsruhe. Laboratorium ITP posiada licencję na prace z 40 gramami trytu.

Na zakończenie omawiania centrów technologicznych warto wspomnieć, że cytowani już wielokrotnie autorzy przeglądu infrastruktury dla programu europejskiego wskazali na potrzebę wzmocnienia programu rozwoju materiałów dla reaktorów fuzyjnych, a więc na potrzebę rozwoju laboratoriów, w których opracowywane są nowe materiały, które w przyszłości będą badane w centrum IFMIF lub reaktorze ITER.

Centra obliczeniowe

Potrzeby w zakresie modelowania i obliczeń numerycznych w programie energetyki termojądrowej są ogromne. Badania modelowe prowadzone są dla rozwiązywania zagadnień fizyki plazmy, planowania scenariuszy eksploatacji ITER-a / DEMO oraz rozwoju nowych materiałów. Obecnie prace te prowadzone są w centrach obliczeniowych, które nie są specjalnie dedykowane do badań fuzyjnych, i prowadzą badania w wielu dziedzinach nauki. W ramach europejskiego programu syntezy termojądrowej powstają w Europie dwa dedykowane centra obliczeniowe. Są to: projekt GATEWAY, którego moc obliczeniowa jest niewielka (1 Tflop) oraz projekt HPC-FF o mocy obliczeniowej kilkuset Tflop. Centrum GATEWAY zlokalizowane jest we Włoszech i już teraz wykorzystywane przez grupę ITM (*Integrated Tokamak Modelling*), natomiast HPC-FF powstanie w Niemczech w Juelich i początkowo ma dysponować mocą 100 Tflop. Jednocześnie z projektami europejskimi, w ramach programu realizowany jest projekt IFERC (*International Fusion Energy Research Centre*), który ma doprowadzić do powstania w 2012 roku centrum obliczeniowego w Japonii w Rakkasho, o mocy obliczeniowej 1 Pflop.

Ta infrastruktura prawdopodobnie nie spełni wszystkich oczekiwań i nie zaspokoi wszystkich potrzeb programu, tak więc w obszarze dedykowanych centrów obliczeniowych potrzebne będą nowe inwestycje infrastrukturalne.

1.2.2. Inercyjne utrzymanie plazmy

W metodzie inercyjnego utrzymania plazmy wykorzystuje się ciśnienie wywierane przez promieniowanie elektromagnetyczne na materię do sprężenia paliwa (np. mieszanki deuter – tryt) i ściśnięcie go do bardzo małych objętości. Powoduje to wzrost gęstości paliwa, jego ogrzanie i zainicjowanie reakcji syntezy. Reakcja ta ma charakter wybuchu, w którym generowana jest duża ilość energii. Energię tę można wykorzystać do generacji prądu elektrycznego. W technologii ICF stosowane są lasery wysokich mocy, które pozwalają na wytworzenie odpowiednio dużego ciśnienia sprężającego paliwo.

HiPER (EU)

HiPER będzie urządzeniem wyposażonym w laser wielkiej mocy, które zademonstruje możliwość wykorzystania technologii inercyjnego utrzymania plazmy do wytwarzania energii. Projekt ten opracowany w 2004 roku i zaakceptowany przez Europejskie Forum Strategiczne ds. Infrastruktury Badawczej został włączony do jej mapy drogowej w październiku 2006 roku. W roku 2007 złożono wniosek do 7PR i w kwietniu 2008 roku projekt został uruchomiony. Celem 3-letniego projektu jest przygotowanie dokumentacji pozwalającej na opracowanie wariantów konstrukcyjnych urządzenia oraz oszacowanie kosztów przedsięwzięcia.

W projekcie zostaną wykorzystane doświadczenia z obszaru technologii i fizyki zdobyte przy eksploatacji lasera PETAL w Akwitanii we Francji.

ELI (EU)

Projekt ELI (*Extreme Light Infrastructure*) jest realizowany przy współpracy 13 państw europejskich. W projekcie będą realizowane 3 główne tematy:

- badania związane z oddziaływaniem wiązek laserowych o ultra wysokiej mocy z materią,
- wykorzystanie laserów attosekundowych w celu badania zjawisk zachodzących w niesłychanie krótkim czasie, tj. dynamiki ruchów elektronów w atomach i molekułach czy dynamiki plazmy.

Projekt znajduje się obecnie w fazie przygotowawczej, która rozpoczęła się w listopadzie 2008 roku i trwać będzie do końca roku 2010. Następnie infrastruktura powinna powstać do końca 2015 roku.

LMJ (FRANCJA)

Laser Mégajoule (LMJ) jest również laserem wielkiej mocy budowanym w Bordeaux we Francji. Laser ten będzie miał moc 1,8 MJ, która będzie wytwarzana przez 240 wiązek laserowych skupianych na niewielkim punkcie w przestrzeni, gdzie umieszczane będą pastylki z paliwem jądrowym. LMJ będzie największym tego typu urządzeniem pracującym poza Stanami Zjednoczonymi, gdzie realizowany jest projekt NIF (patrz poniżej). 240 wiązek laserowych w LMJ zgrupowanych jest w 30 liniach po 8 wiązek każda. Wykorzystywane są lasery oparte na wyładowaniach lamp ksenonowych. W eksperymencie tym wiązki skupiane będą na pastylce paliwowej zbudowanej z kapsuły z pierwiastków ciężkich, w której zamknięta jest mieszanka deuteru i trytu. Pod działaniem wiązki laserowej dochodzi do podgrzania i wzbudzenia materiału kapsuły, który „odparowując” emituje promieniowanie rentgenowskie. To promieniowanie z kolei podgrzewa mieszankę paliwową D-T i inicjuje reakcję syntezy, która przebiega z wydzielaniem dużej ilości energii, głównie w postaci promieniowania neutronowego. Oczekuje się, że kompletny system zostanie oddany do eksploatacji w 2012 roku.

NIF (Stany Zjednoczone)

The National Ignition Facility w Stanach Zjednoczonych w *Lawrence Livermore National Laboratory* (LLNL) posiada obecnie największy laser wielkiej mocy, który został oddany do użytku we wrześniu 2009. Pierwsze eksperymenty planowane są na początek 2010 roku. Wiązki lasera ultrafioletowego skupiane będą na pastylce paliwowej w postaci kapsuły z pierwiastków ciężkich zawierającej we wnętrzu mieszankę deuteru i trytu. W NIF prowadzone będą także eksperymenty dla programów bezpieczeństwa narodowego USA, badań fizyki plazmy, rozwoju nowych rodzajów broni i innych.

FIREX (JAPONIA)

W Japonii już od wielu lat realizowany jest program FIREX, *Fast Ignition Realization Experiment*, którego podstawowym celem jest wykazanie, że wykorzystanie technologii inercyjnego utrzymania plazmy z zastosowaniem szybkiego zapłonu może w efekcie doprowadzić do opracowania projektu elektrowni termojądrowych. Program obecnie wszedł w fazę

FIREX II. Przy założeniu, że projekt otrzyma odpowiednie finansowanie przewiduje się, że jego cel nadrzędny powinien być osiągnięty do roku 2030.

SG-III (CHINA)

Urządzenie SG-III jest kolejnym laserem wielkiej mocy, który budowany jest w Chinach w Centrum Badawczym Syntezy Laserowej *China Academy of Engineering Physics* (CAEP). SG-III będzie wykorzystywany do prowadzenia badań zarówno metody inercyjnego utrzymania plazmy z zapłonem bezpośrednim jak i tzw. szybkim zapłonem (ang. *fast ignition*). Układ ma być w pełni oddany do eksploatacji w 2012 roku. Będzie składał się z 48 wiązek laserowych o łącznej mocy ok. 200 KJ. W technologii szybkiego zapłonu wykorzystywany będzie dodatkowo petawatowy laser o mocy kilkudziesięciu KJ.

1.3. Infrastruktura badawcza dostępna w krajowych ośrodkach naukowych zaangażowanych w program badań nad energetyką termojądrową

Infrastruktura badawcza dostępna w krajowych ośrodkach naukowych obejmuje:

- a. urządzenia do wytwarzania plazmy o parametrach termojądrowych,
- b. aparaturę diagnostyczną do pomiaru podstawowych parametrów plazmy (temperatura, gęstość, czas utrzymania), jej struktury przestrzennej i zmienności parametrów w czasie, a także do pomiarów strumieni cząstek i promieniowania emitowanych przez plazmę,
- c. aparaturę, nie związaną bezpośrednio z wytwarzaniem i diagnostyką plazmy termojądrowej, a mogącą służyć do badania *post-mortem* skutków oddziaływania gorącej plazmy z różnymi materiałami proponowanymi na pierwszą ściankę reaktora termojądrowego,
- d. aparaturę do detekcji produktów reakcji syntezy (neutronów, cząstek alfa).

Wymieniona infrastruktura badawcza znajduje się w ośrodkach badawczych, w rękach doświadczonych zespołów grupujących wysokiej klasy specjalistów w zakresie fizyki plazmy termojądrowej, technologii, budowy i zasad działania często wysokospecjalistycznej aparatury naukowej.

Aparatura badawcza wymieniona w punktach a, b jest skoncentrowana głównie w Instytucie Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy oraz w mniejszym stopniu w Instytucie Problemów Jądrowych.

Głównym urządzeniem badawczym w IFPiLM w Oddziale Plazmy Namagnetyzowanej (OPN), wokół którego ogniskuje się program naukowy związany z badaniami nad plazmą termojądrową utrzymywaną i komprymowaną polem magnetycznym oraz oddziaływaniem plazma - materiał ścianki, jest urządzenie, a właściwie kompleks badawczy PF-1000.

Urządzenie PF-1000 jest układem *Plasma-Focus* (PF) typu Mathera należącym do klasy nie cylindrycznych układów *Z-pinch*, na których prowadzi się badania fizyki gorącej plazmy ($T > 1$ keV) utrzymywanej polem magnetycznym wytwarzanym przez prąd płynący w plazmie. PF-1000 służy do wytwarzania plazmy o parametrach termojądrowych i czasie życia rzędu mikrosekundy. Ze względu na swoje parametry techniczne oraz wyposażenie diagnostyczne jest urządzeniem pozwalającym na wykonywanie wielu interesujących eksperymentów z zakresu plazmy termojądrowej.

W skład PF-1000 wchodzi trzy główne zespoły elementów, a mianowicie:

1. Bateria kondensatorów, o łącznej pojemności 1,332 mF, składająca się z dwunastu modułów, z których każdy zawiera 24 nisko-indukcyjne, wysokonapięciowe (50 kV) kondensatory o pojemności 4,625 μ F każdy, połączone równolegle. Bateria jest wyposażona w nowoczesny system automatycznego sterowania ładowaniem baterii.
2. Komora eksperymentalna o wymiarach ($\Phi = 1,4$ m, $l = 2,5$ m) otaczająca cylindryczne, współosiowe elektrody układu wykonana jest ze stali nierdzewnej i połączona z kolektorem generatora prądowego. Zewnętrzna elektroda (katoda) składa się z 12 prętów wykonanych ze stali nierdzewnej, natomiast elektroda wewnętrzna (anoda) o średnicy 23 cm i długości 60 cm wykonana została z czystej miedzi. Elektrody rozdziela izolator wykonany z aluminy o długości 11,3 cm, leżący na anodzie. Próżnia w komorze wytwarzana jest za pomocą systemu pomp rotacyjnych i turbomolekularnych.
3. Szereg układów diagnostycznych do pomiaru promieniowania emitowanego z plazmy i jej parametrów wraz z komputerowym systemem akwizycji danych.

Podsumowując, w generatorze prądowym układu PF-1000 przy napięciach ładowania w przedziale $U_0 = 20 - 40$ kV można zgromadzić energię elektryczną rzędu 266 – 1064 kJ, co pozwala otrzymać prąd zwarcia $I_{sc} = 12$ MA w czasie rozładowania do maksimum prądu $T_{1/4} = 5,4$ μ s. Układ PF-1000 może pracować praktycznie z energią 1000 kJ zgromadzoną w baterii.

W skład trzeciej części składowej kompleksu badawczego wchodzi liczne układy diagnostyczne do pomiarów promieniowania emitowanego z plazmy i jej parametrów. Układy do pomiarów impulsów elektrycznych oraz system załączania układów rejestracyjnych i diagnostycznych składają się z detektorów usytuowanych na komorze eksperymentalnej oraz z wielokanałowego układu kontroli, gromadzenia i analizy sygnałów. W celu eliminacji wszelkich zaburzeń, sygnały z detektorów są transmitowane do głównego układu kontroli i gromadzenia danych za pomocą światłowodów, a układ kontroli znajduje się w ruchomej klatce Faraday'a z własnym zasilaniem. Ze względu na poziom zakłóceń elektromagnetycznych klatka jest odłączana w czasie trwania zjawiska na czas pracy baterii kondensatorów układu PF-1000. Poszczególne detektory, w zależności od wielkości fizycznych, które mierzą, można pogrupować w sposób następujący:

- Pasy Rogowskiego do pomiaru prądu umieszczone w kolektorze i w komorze próżniowej w pobliżu katody, sonda magnetyczna do pomiaru pochodnej prądu umieszczona w kolektorze, opcjonalnie trzy sondy do pomiaru pola magnetycznego w przestrzeni między elektrodami oraz pojemnościowa sonda do pomiaru napięcia między elektrodami,
- Detektor PIN1, umieszczony w oknie diagnostycznym, rejestrujący promieniowanie w zakresie widzialnym, z obszaru usytuowanego w odległości 20 mm od centralnej elektrody PF-1000, na osi elektrod, detektor PIN2, umieszczony w innym oknie diagnostycznym niż PIN1, rejestrujący poprzez otwór o średnicy 100 μ m, przykryty folią berylową o grubości 20 μ m, miękkie promieniowanie X z tego samego obszaru, co detektor PIN1.

Ze względu na bardzo krótki czas trwania zjawisk (od pojedynczych nanosekund do kilkunastu mikrosekund) układ rejestrujący świecenie plazmy został wykorzystany do uruchomienia wszystkich bardzo szybkich diagnostyk plazmy. W ten sposób w eksperymentach start wszystkich diagnostyk służących do pomiarów parametrów plazmy jest skorelowany bezpośrednio ze zjawiskiem, czyli ewolucją plazmy. Pozwala to uruchamiać diagnostyki w tym samym momencie trwania zjawiska, niezależnie od zmian warunków prowadzenia eksperymentu.

Do rejestracji promieniowania emitowanego w różnym zakresie widma z plazmy wytwarzanej w PF-1000 układ jest obecnie wyposażony w system kamer obserwujących obszar tworzenia się ogniska plazmowego w zakresie promieniowania miękkiego promieniowania rentgenowskiego, oraz układ do fotografii laserowej i interferometrii:

- Kamera smugowa FENIX II z podstawą czasu 2 μ s,
- Rentgenowska kamera kadrowa rejestrująca miękkie promieniowanie X w systemie cztero kadrowym z odstępem czasowym 20 ns,
 - Interferometr Macha-Zendera.

Promieniowanie neutronowe i twarde promieniowanie X z plazmy wytwarzanej w układzie PF-1000 jest mierzone dwoma niezależnymi typami detektorów:

- Aktywacyjnymi licznikami srebrowymi, wyskalowanymi za pomocą źródła neutronowego Am-Be, umieszczonymi pod różnymi kątami i w różnych odległościach od ogniska plazmowego, umożliwiającymi bezwzględny pomiar wydatku neutronowego z ogniska plazmowego,
- Trzema sondami scyntylicyjnymi z fotopowielaczami umieszczanymi pod różnymi kątami i w różnych odległościach od ogniska plazmowego, umożliwiającymi czasowy pomiar sygnału neutronowego i twardego promieniowania rentgenowskiego.

Kompleks badawczy zlokalizowany jest w specjalnie zbudowanej hali (kubatura 32345 m³, powierzchnia 5154 m²) i zajmuje trzy kondygnacje części murowanej hali (kubatura 7488 m³, powierzchnia 1404 m²):

- Parter - podstawa kolektora prądu i komory eksperymentalnej oraz 1/2 baterii kondensatorów,
- I piętro - kolektor prądu, komora eksperymentalna oraz sterownia generatora,
- II piętro - 1/2 baterii kondensatorów generatora.

W 2006 roku układ PF-1000 został dodatkowo wyposażony w laser diagnostyczny do interferometrii oraz detektor germanowy HPGe do pomiaru promieniowania gamma z próbek aktywowanych neutronami emitowanymi z plazmy.

Opisane urządzenie PF-1000 o takiej skali, wyposażone w szereg wymienionych diagnostyk jest jedynym tego rodzaju urządzeniem na świecie i ma olbrzymie znaczenie dla:

- Rozwoju fizyki plazmy termojądrowej, plazmy komprymowanej i utrzymywanej indukowanym polem magnetycznym, w szczególności dla poznania przyczyn generacji wiązek jonów i elektronów powstających w takiej plazmie oraz określenia szybkości reakcji syntezy jąder deuteru w zależności od parametrów technicznych układu,
- Przygotowania aktywacyjnej diagnostyki neutronowej w ramach programu EURATOM,
- Opracowania nowych metod diagnostycznych związanych z rejestracją produktów reakcji syntezy jądrowej i promieniowania plazmy w korelacji z ewolucją i dynamiką plazmy,
- Opracowania nowych technik diagnostycznych w celu rejestracji ultraszybkich procesów.

O zakresie i stopniu wykorzystania układu PF-1000 świadczą międzynarodowe wieloletnie programy naukowe realizowane pod auspicjami UNESCO, Unii Europejskiej oraz Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej, a mianowicie:

- Program realizowany w ramach Międzynarodowego Centrum Gęstej Namagnetyzowanej Plazmy pod auspicjami UNESCO,
- Program EURATOM realizowany na podstawie kontraktu zawartego z *European Atomic Energy Community*; Association-IPPLM; Nr FU06-CT-2004-00081,
- 6PR *Infrastructure-5, Transnational Access to Major European Facilities, Megajoule Plasma-Focus* PF-1000, 026095(RITA) MJPF-1000,
- Umowa o współpracy w zakresie rozwoju diagnostyk dla stelleratora W7-X pt. *Neutron Diagnostics for W7-X* zawarta na okres 1/01/2006 do 31/12/2008 z *Max-Planck-Institut für Plasmaphysik Teilinstitut* Greifswald Wendelsteinstrasse 1D- 17491 Greifswald, Germany,
- Projekt Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej: *Investigations of the ionizing radiation efficiency and spectra from 1.2 MJ plasma focus device and its applications*; 11941/R0/2005.

Część prac naukowo badawczych w zakresie oddziaływaniami intensywnych strumieni cząstek i plazmy z różnymi materiałami jest prowadzona na podstawie bilateralnych umów pomiędzy instytutami lub w ramach krajowych i międzynarodowych grantów badawczych.

Ponadto, na urządzeniu PF-1000 będzie testowany system do aktywacyjnych pomiarów neutronowych przygotowywanych dla W7-X w ramach umowy z IPP Greifswald oraz są realizowane badania w ramach sieci badawczej p.t. Neutrony – Emisja – Detekcja, skupiającej oprócz Instytutu Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy, Instytut Fizyki Jądrowej w Krakowie, Instytut Problemów Jądrowych i Instytut Energii Atomowej w Świerku k/Warszawy.

Krajowe i międzynarodowe środowisko naukowego może korzystać z urządzenia PF-1000 na podstawie:

- Umowy o współpracy w zakresie rozwoju diagnostyk dla stelleratora W7-X (j.w.),
- Współpracy w ramach sieci naukowo-badawczej – Neutrony-Emisja-Detekcja,
- Umów o współpracy podpisanych na szczeblu Instytutów np. umowa pomiędzy IPJ a IFPiLM; Uniwersytetem Sofijskim a IFPiLM, *National Institute for Laser, Plasma and Radiation Physics*, Bucharest a IFPiLM, *Turkish Atomic Energy Authority* a IFPiLM, *Nanyang Technical University* (Singapur) a IFPiLM,
- Umów o współpracy międzynarodowej podpisanych na szczeblu rządowym np. umowa pomiędzy Rosją i Polską,
- W ramach Międzynarodowego Centrum Gęstej Namagnetyzowanej Plazmy,
- W ramach krajowych i międzynarodowych grantów przyznawanych na konkretne tematy np. granty IAEA,
- Na podstawie kontraktów na wykonanie określonych badań naukowych podpisanych z różnymi organizacjami np. kontrakt z *Korean Institute of Science and Technology*,
- W ramach kontraktu Unii *Transnational Access – Research Infrastructures* (j.w.).

Większość pracowników Instytutu skupionych w OPN to pracownicy naukowcy, w tym: profesorowie (2), doktorzy habilitowani (2) doktorzy nauk (9), mający doświadczenie w pracy na dużych układach eksperymentalnych, gdyż na co dzień pracują na układzie PF-1000, jednym z największych tego typu układów na świecie. Zakład dysponuje też własnym zapleczem technicznym (warsztat mechaniczny i elektryczno-elektroniczny) oraz grupą inżynierów i techników (9).

Działalność IFPiLM w zakresie realizacji prac badawczych i technologicznych w dotyczących laserowej syntezy termojądrowej i oddziaływań intensywnych laserów z materią koresponduje z europejskimi projektami HiPER, ELI i LASERLAB-Europe, w których IFPiLM też uczestniczy. Ośrodek Plazmy Laserowej (OPL) w IFPiLM wyspecjalizował się w tych badaniach w ciągu ponad 30 lat uczestnicząc i w wielu przypadkach koordynując różne projekty europejskie. OPL zatrudnia w sumie 25 pracowników, w tym doświadczoną kadrę naukową (1 profesor, 2 dr hab. i 4 dr) oraz techniczną (3 mgr inż.) i kilku wyspecjalizowanych techników, a także 3 doktorantów.

Zasoby Oddziału Plazmy Laserowej w IFPiLM są w całości wykorzystywane do badań dotyczących laserowej syntezy termojądrowej oraz badań fizyki i zastosowań plazmy laserowej. Do tych prac wykonywanych w laboratoriach OPL IFPiLM oraz dla wspólnych eksperymentów realizowanych w ośrodkach zagranicznych wykorzystywana jest następująca aparatura badawcza:

- Laser neodymowy CPA (obecnie remontowany) o następujących parametrach: długość fali promieniowania 1,054 μm , moc w impulsie $\sim 1 \text{ TW}$, energia w impulsie $\sim 1 \text{ J}$, czas trwania impulsu 1 ps, maksymalna gęstość mocy $\sim 10^{17} \text{ W/cm}^2$,
- Repetytywny laser neodymowy o następujących parametrach: długości fali promieniowania 1,06 μm , 0,58 μm (II harmoniczna), lub 0,352 μm (III harmoniczna), maksymalna energia w impulsie $< 0,81 \text{ J}$ (dla I-ej harmonicznej), czas trwania impulsu 3,5 ns, maksymalna częstota repetycji 10 Hz,
- Układy dla jonowej diagnostyki plazmy:
 - elektrostatyczny analizator energii jonów emitowanych z plazmy laserowej,
 - spektrometr masowy parabol Thomsona,
 - kolektory jonów,
 - detektory śladowe,
- Układy dla diagnostyki promieniowania rentgenowskiego emitowanego z plazmy laserowej:
 - spektrometr krystaliczny,
 - analizator amplitudy impulsów rentgenowskich,
- różne detektory półprzewodnikowe,
 - 3-kadrowy interferometr laserowy,
 - Spektrometr promieniowania widzialnego emitowanego z plazmy laserowej,
 - 4 próżniowe stanowiska dla badań oddziaływań laser-materia,
 - Różne układy do badania parametrów promieniowego laserowego.

W OPL znajduje się pracownia technologiczna przygotowująca tarcze dla badań oddziaływań laser-materia i inne elementy niezbędne dla tych badań.

Aparatura badawcza wymieniona w punktach c, d na początku rozdziału występuje w Instytutach skupionych w Asocjacji EURATOM-IPPLM realizujących poszczególne zadania związane z badaniami termojądrowymi w Europie.

Instytut Fizyki Jądrowej prowadzi badania związane z transportem i detekcją neutronów od ponad 40. lat. Zbudowany w latach 60. generator neutronów 14 MeV stanowił pierwszą własną bazę eksperymentalną dla tych badań. Różnorodność tematyki badawczej, możliwość realizacji licznych projektów o zasięgu krajowym i międzynarodowym, trwałość i rozwój kadry naukowej spowodowały, że obecnie grupa badawcza działająca w strukturze Zakładu Fizyki Transportu Promieniowania (FTP) posiada silną renomowaną pozycję naukową. Efektem wieloletniej działalności zespołu jest m.in. wykształcenie kadry naukowej, z której część w dalszym ciągu związana jest z IFJ PAN. W całym okresie działalności „grupy neutronowej” zrealizowanych zostało 16 prac doktorskich. Dalszy rozwój naukowy wypromowanych doktorów związany jest nie tylko z IFJ, ale również z innymi ośrodkami naukowymi, nie tylko polskimi.

W obecnie działającym Zakładzie FTP zatrudnionych jest 2 samodzielnych pracowników naukowych i 3 adiunktów. Oprócz tego w Zakładzie FTP pracuje 5 specjalistów i inżynierów posiadających rozległą wiedzę z zakresu modelowania Monte Carlo i obliczeń neutronowych, systemów detekcji neutronów, budowy aparatury badawczej. Samodzielni pracownicy naukowcy oprócz pracy badawczej angażują się w kształcenie doktorantów. Zespół ma duże doświadczenie naukowe i zawodowe w zakresie aparatury i pomiarów neutronowych. Oprócz doświadczenia zdobytego w pracy w IFJ PAN, pracownicy pogłębiali swoją wiedzę w ośrodkach zagranicznych: w Chalmers University w Szwecji (fizyka reaktorowa, pomiary neutronowe), w Centro Atomico Bariloche w Argentynie (fizyka neutronowa), w Culham w Wielkiej Brytanii (tokamak JET), w Greifswaldzie w Niemczech (projekt stelaratora W7-X), w CERN w Szwajcarii (przy budowie zderzacza hadronów LHC). W zakresie obliczeń numerycznych i korzystania z dużych kodów obliczeniowych dla transportu neutronów pracownicy byli szkoleni w ośrodkach zagranicznych (Los Alamos w USA, DESY w Niemczech, w Wielkiej Brytanii, we Włoszech). Również w zakresie detekcji cząstek opartej o detektory diamentowe IFJ PAN dysponuje kadrą o bogatym doświadczeniu w opracowaniu detektorów budowanych na strukturach diamentowych. Współpraca z ośrodkami w Saclay, Francja (program Polonium 2001-2003), w Nowosibirsku, Rosja czy z Instytutem Fizyki w Pradze, Czechy, jak również uczestnictwo w dwóch projektach finansowanych przez 6 PR UE umożliwiło wymianę doświadczeń z innymi zespołami, co znacznie poszerzyło wiedzę na temat własności diamentów i ich możliwości detekcyjnych.

Zakład FTP zajmuje się fizyką oddziaływania neutronów i innego promieniowania jądrowego (m.in. gamma) z różnymi ośrodkami, włączając zagadnienia geofizyki jądrowej. Prowadzone prace dotyczą zarówno teorii, obliczeń analitycznych, eksperymentów jak i konkretnych zastosowań. Dużą część prac realizowanych w Zakładzie stanowią obliczenia i modelowanie numeryczne.

Od 2006 roku Zakład FTP rozszerzył działalność na problemy badawcze związane z diagnostykami neutronowymi oraz pomiarami cząstek alfa dla plazmy wysokotemperaturowej komprimowanej polem magnetycznym. Zakład podjął współpracę z Instytutem Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy, Instytutem Energii Atomowej oraz Instytutem Problemów Jądrowych. Współpraca ta została sformalizowana już w 2006 roku przez zawarcie umowy o powołaniu Sieci Naukowej Neutrony-Emisja-Detekcja, której działalność jest

koordynowana przez IFJ PAN. Od kilku lat nasze Instytuty uczestniczą w projektach badawczych i gremiach naukowych skupionych wokół tematyki diagnostyk neutronowych dla gorącej plazmy, głównie w ramach kontraktów z Unią Europejską poprzez Asocjację EURATOM-IPPLM.

IFJ PAN dysponuje następującą infrastrukturą badawczą dla potrzeb prac badawczych związanych z diagnostyką plazmy fuzyjnej:.

1. Akceleratorowy impulsowy generator neutronów 14 MeV.

Impulsowy generator neutronów prędkich o energii 14 MeV z komorą termostatyczną pracuje w systemie przyspieszania jonów deuteru, które wywołują reakcję jądrową z trytem (D+T) zaabsorbowanym w stałej tarczy. Generator jest urządzeniem *home made*, którego początki sięgają lat 60-tych ubiegłego stulecia. Oczywiście urządzenie było kilkakrotnie modernizowane, co głównie sprowadziło się do wymiany zasilaczy wysokonapięciowych i układu pomp wysokiej próżni. Koncepcja działania urządzenia polegająca na przyspieszaniu jonów deuteru (produkowanego na bieżąco w elektrolizerze ciężkiej wody) oraz sposób impulsowego dawkowania jonów deuteru do rury akceleracyjnej, konstrukcja i chłodzenie tarczy trytowej, w zasadzie nie uległy poważniejszym zmianom. Istotnym ograniczeniem generatora jest brak możliwości uzyskania neutronów o energii 2,5 MeV z reakcji D+D ze względu na zbyt małą wydajność tej reakcji przy możliwościach technicznych urządzenia. Natomiast atutem tego urządzenia jest możliwość pomiaru cząstek alfa będących produktem reakcji D-T. Posiadany w IFJ PAN generator neutronów jest niewystarczający do planowanych na przyszłość projektów związanych z diagnostyką plazmy. Zasadnicze powody to: silne zużycie urządzenia, brak neutronów 2.5 MeV, za mała intensywność emisji neutronów (zarówno w pojedynczym impulsie, jak i dla celów efektywnej aktywacji próbek).

2. Źródło neutronowe *Plasma-Focus* - w trakcie zakupu.

Z uwagi na zaangażowanie IFJ PAN w badania związane z fuzją termojądrową zostały podjęte intensywne działania w celu stopniowej modernizacji infrastruktury badawczej. Do końca 2009 roku zostanie w IFJ PAN zainstalowane źródło neutronowe typu *Plasma-Focus*. Jest to impulsowe źródło neutronowe emitujące ok. 10^9 neutronów o energii 2.5 MeV w impulsie o czasie trwania ok. 50 ns albo 10^6 n podczas impulsu 10 ns. Na stanowisku pomiarowym będą testowane systemy spektrometrycznej detekcji neutronów metodą czasu przelotu, układy detekcji neutronów oparte o scyntylacyjne detektory punktowe (SOF), systemy aktywacyjne, systemy detekcji neutronów opóźnionych z aktywacji materiałów rozszczepialnych oraz będą prowadzone prace rozwojowe dla potrzeb jądrowej geofizyki poszukiwawczej. Zakup źródła *Plasma-Focus* jest pierwszym krokiem w budowie **Centrum Rozwoju Metod Detekcji Neutronów dla Energetyki (Syntezy) Termojądrowej w IFJ PAN**.

3. Wyposażenie dodatkowe.

Zakład FTN posiada zaplecze aparaturowe wyposażone w systemy monitorujące dla neutronów prędkich 14 MeV, systemy pomiarowe dla neutronów termicznych w zakresie analizy mikrosekundowej oraz system spektrometryczny do detekcji cząstek alfa. Własne zaplecze komputerowe stanowi 48. rdzeniowy klaster komputerowy McRiadat służący głównie do symulacyjnych obliczeń neutronowych. Głównym oprogramowaniem jest MCNP (*Monte Carlo N-particle Transport Code*) do komputerowej symulacji transportu promieniowania, w tym promieniowania neutronowego, wraz z dodatkiem 3D CAD, który służy do czytania i konwersji plików z geometrią zapisaną w programach typu CAD na format obsługiwany przez

MCNP. Zaplecze mechaniczne do budowy detektorów diamentowych pozwala na wykonywanie uchwytów oraz połączeń elektrycznych na strukturach diamentowych jak również napylanie kontaktów elektrycznych.

Z kolei Wydział Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej dysponuje szerokim i nowoczesnym zapleczem urządzeń do badań struktury oraz właściwości materiałów a także do ich wytwarzania. Do najważniejszych urządzeń pozostających w dyspozycji Wydziału należy zaliczyć:

- Wysokorozdzielczy skaningowy transmisyjny mikroskop elektronowy HITACHI HD2700 (o napięciu przyspieszającym 200 kV i zdolności rozdzielczej 0,14 nm) wyposażony w detektory EDS i EELS umożliwiające badania składu chemicznego w nano-obszarach,
- Wysokorozdzielczy skaningowy mikroskop elektronowy HITACHI 5500 (o zdolności rozdzielczej 0,4 nm) wyposażony w detektor EDS do badań składu chemicznego w nanoobszarach,
- Wysokorozdzielczy analityczny skaningowy mikroskop skaningowy HITACHI SU70 z dużą komorą umożliwiającą badania próbek litych, wyposażony w detektory EDS i WDS umożliwiające badania składu chemicznego oraz EBSD pozwalający na obrazowanie orientacji krystalograficznej w polikryształach,
- Wysokorozdzielczy transmisyjny mikroskop elektronowy JEM 3010 (o zdolności rozdzielczej 0,19 nm i napięciu przyspieszającym 300 kV) umożliwiający badania składu fazowego i chemicznego w nanoobszarach (*Nanometer Beam Diffraction* oraz EDS) oraz symetrii kryształów z zastosowaniem dyfrakcji zbieżnej wiązki elektronów (*Convergent Beam Diffraction*),
- Skaningowo-transmisyjny mikroskop elektronowy JEOL JEM 1200 EX II wyposażony w *holdery* pozwalające na obserwacje *in-situ* procesów zachodzących podczas grzania i rozciągania preparatów,
- Mikroskop jonowy FB-2100 stosowany do przygotowywania preparatów do wysokorozdzielczych mikroskopów elektronowych umożliwiający precyzyjny wybór miejsca pobrania próbki, obróbkę materiałów o diametralnie różnych właściwościach, tj. materiały ceramika-metal i wykonywanie przekrojów w układach wielowarstwowych,
- Mikroskop sił atomowych *NanoScope Multimode IVa* do obrazowania topografii preparatu w skali atomowej, mapowania właściwości magnetycznych, chemicznych, mechanicznych i dielektrycznych powierzchni,
- Spektroskop elektronów Auger z przystawką XPS - MICROLAB 350 (eksploatowany wspólnie z Instytutem Chemii Fizycznej w Warszawie) umożliwiający analizę składu chemicznego i fazowego preparatów jak również wykonywanie profili rozkładu pierwiastków w głąb materiału,
- Dyfraktometr rentgenowski BRUKER D8 DISCOVER umożliwiający analizę składu fazowego, pomiary naprężeń jak również analizy cienkich warstw (reflektometria wysokiej rozdzielczości), mikro- i nano-tomografy rentgenowskie firmy SKYSCAN umożliwiające trójwymiarowe obrazowanie struktury materiałów.

Na Wydziale są dostępne specjalistyczne urządzenia do badań właściwości mechanicznych w próbach statycznych i dynamicznych:

- MTS 810 100 kN,
- MTS 858 25 kN,
- MTS w układzie poziomym 15 kN,
- MTS – Tytron 0,25 kN,
- MTS-Qtest 10 kN,
- Zwick Z050 50 kN,
- Zwick Z005 5 kN,
- Zwick Z250 250 kN.

Ponadto do badań właściwości mechanicznych wykorzystywane są nano-twardościomierz firmy HYSITRON oraz mikro-twardościomierz firmy ZWICK.

Wydział dysponuje także urządzeniami do badania właściwości:

- Termicznych – skaningowe kalorymetry różnicowe DSC, analizator termogravimetryczny TGA, dynamiczno-mechaniczny analizator termiczny DMA),
- Magnetycznych – magnetometr z wibrującą próbką (ang. VSM) firmy LAKE-SHORE, histerezograf wysokoczęstotliwościowy Walker AMH-401A,
- reologicznych (ARES RHEOLOGY – TA Instruments),
- odporności na zużycie przez tarcie,
- odporności korozyjnej,
- topografii powierzchni – profilometr optyczny firmy WYKO.

Kolejną ważną grupą urządzeń dostępnych na Wydziale są urządzenia do badań nie niszczących, które pozwalają na prowadzenie analiz na obiektach w miejscu ich eksploatacji:

- System do badań emisji akustycznej VALLEN AMSY-5,
- Przyrząd do prądów wirowych z wyposażeniem MIZ-27Si,
- Defektoskopy ultradźwiękowe KRAUTKRAMER i PHASE ARRAY Omni-Scan MX,
- Przenośne spektroskopy optyczne i rentgenowskie do badania składu chemicznego.

Na wyposażeniu Wydziału jest także szereg urządzeń do syntezy i modyfikacji materiałów, w tym w szczególności:

- Urządzenie do impulsowej konsolidacji proszków,
- Magnetronowe źródło plazmy służące do wytwarzania różnego rodzaju warstw,
- Urządzenia do obróbek jarzeniowych (azotowania, tlenoazotowania, węgloazotowania),
- Urządzenie do realizacji procesów PACVD z wykorzystaniem związków metaloorganicznych,
- Meltspiner HW do wytwarzania materiałów amorficznych i nanokrystalicznych.

Użytkownicy ww. aparatury to pracownicy naukowo-badawczy, doktoranci oraz dyplomanci wykonujący prace usługowe dla przemysłu, prace własne, habilitacje, doktoraty oraz prace dyplomowe.

Przy wykorzystaniu tej aparatury prowadzone są badania z zakresu:

(1) zmian topografii powierzchni materiału (techniki SEM, HRSEM, FIB, profilometr optyczny, mikroskop sił atomowych), analizy mikrostruktury obejmujące (2) badania metalograficzne, określenie wielkości i kształtu ziarna polikryształów, orientacji (EBSD, XRD - badania tekstury) i charakterystyki wydzielen (3) zmiany składu chemicznego z wykorzystaniem technik EDS, XRD, XPS i AES; (4) badania właściwości fizycznych, w tym mechanicznych, elektrycznych i cieplnych.

Ponadto na Wydziale prowadzone są prace z zakresu inżynierskich obliczeń numerycznych z wykorzystaniem metody elementów skończonych.

Ważną rolę w przyszłych badaniach nad fuzją termojądrową może odegrać badawczy reaktor jądrowy MARIA (lub jego następca) znajdujący się w Instytucie Atomowym w Świerku. Pierwszy etap badań materiałowych zorientowanych na optymalizację parametrów termodynamicznych nisko-aktywacyjnej stali martenzytowej oraz stopów wolframu na potrzeby fuzji termojądrowej przewidywany jest właśnie w oparciu o badawcze reaktory jądrowe. Reaktor MARIA o mocy 20-30 MW jest uznawany za jeden z najlepszych reaktorów badawczych w Europie z czasem rocznej eksploatacji na poziomie 3300 godzin. Warto podkreślić, że obecnie w Europie pozostało zaledwie 8 reaktorów badawczych o mocy ponad 15 MW i strumieniu neutronów większym niż $1 \cdot 10^{14}$ n/cm²sek. Reaktor ten, charakteryzujący się wysokim strumieniem zarówno neutronów termicznych jak i prędkich w rdzeniu, daje możliwość wielorakich badań, w tym badań materiałowych na potrzeby energetyki termojądrowej. Obecnie wykorzystywany jest do badań radioizotopów, badań na wiązkach neutronów, neutronografii oraz do analizy aktywacyjnej.

1.4. Potrzeby Europejskiego Programu Badań nad syntezą termojądrową i udział Polski

Ostatnie osiągnięcia badawcze w sposób znaczący zwiększyły zakres wiedzy w dziedzinie fizyki plazmy i jej praktycznego zastosowania. Na podstawie aktualnej wiedzy dotyczącej własności plazmy i sposobów jej produkcji, rozwoju badań materiałowych oraz technologii stało się możliwe stworzenie wstępnych projektów elektrowni termojądrowych (*The European Power Plant Conceptual Study - PPCS*) [xiii]. Projekty te obejmują cztery dość precyzyjnie opisane modele elektrowni termojądrowych. Wszystkie modele przewidują działanie reaktora o mocy wyjściowej ~1,3-1,5 GW na bazie tokamaka, a więc w technologii magnetycznego utrzymania plazmy, składającego się z tzw. płaszcza-osłony i *divertora*. W płaszczu elektrowni termojądrowej gromadzi się energia cieplna wytwarzana w procesie spowalniania neutronów powstających w reakcjach fuzji. Neutrony te powinny również być wykorzystane do wtórnej produkcji paliwa termojądrowego – trytu w wyniku reakcji neutronu z litem. Natomiast zadaniem *divertora* jest usuwanie „wypalonych” produktów fuzji, czyli głównie jąder He (cząstek alfa).

Modele różniące się stopniem zaawansowania technologicznego i naukowego odpowiadają różnym scenariuszom rozwoju technologii i fizyki plazmy. W przypadku modeli mniej zaawansowanych technologicznie przewiduje się budowę reaktora termojądrowego

w oparciu o nisko-aktywacyjną stal martenzytową z płaszczem litowo-ołowianym chłodzonym wodą lub ciekłym helem. Podobne systemy chłodzenia wodnego i helowego przewidziano dla *divertorów*. Należy jednak podkreślić, że jedynie technologia chłodzenia wodnego (tzw. technologia wodnego reaktora ciśnieniowego) jest obecnie wykorzystywana w technologiach energetyki jądrowej. Potencjalna możliwość chłodzenia *divertora* ciekłym helem (zwiększająca efektywność termodynamiczną reaktora termojądrowego) wymagać będzie w przyszłości wielu badań, między innymi nad nowymi stopami wolframu. Rozwój nowych technologii uzyskiwania stopów wolframu jest jednym z kluczowych elementów europejskiego programu badań nad energetyką termojądrową. Stopy takie muszą wytrzymać ogromne przeciążenia termodynamiczne, zarówno wewnątrz reaktora, jak również jako moduły płaszcza reaktorowego. Stopy te powinny charakteryzować się niezwykle małymi współczynnikami erozji na poziomie $\sim 0,1$ mm/rok, w warunkach pełnego obciążenia energetycznego (przewidzianego dla plazmy w warunkach ITER-a).

Budowa i eksploatacja reaktorów termojądrowych na bazie bardziej zaawansowanych modeli wymaga uzyskania wyższych temperatur plazmy oraz jeszcze większej efektywności termodynamicznej. W modelach tych przewidziano tzw. podwójny system chłodzenia płaszcza reaktora termojądrowego. System taki może być zbudowany w oparciu o chłodzenie ciekłą mieszkanką LiPb/He lub samym ciekłym związkiem LiPb. W najbardziej zaawansowanym pod względem technologicznym modelu reaktora termojądrowego przewiduje się również chłodzenie *divertora* ciekłym związkiem litowo-ołowianym. Ostatnie z wymienionych rozwiązań najefektywniej poprawiłoby zbilansowanie energetyczne reaktora termojądrowego.

Stworzenie ostatecznego projektu na podstawie jednego z przedstawionych modeli oraz budowa komercyjnej elektrowni termojądrowej wymagać będzie w najbliższej przyszłości jednoczesnego rozwoju i integracji najważniejszych kierunków badań fizyki plazmy. Dlatego kierunek badań naukowych i rozwoju technologicznego krajów uczestniczących w badaniach nad fuzją termojądrową musi prowadzić do precyzyjnego określenia kluczowych parametrów pierwszej demonstracyjnej elektrowni termojądrowej. Grupę tych parametrów stanowią:

- Parametry przestrzenne reaktora termojądrowego,
- Moc wyjściowa elektrowni,
- Parametry plazmy (profile temperatury i gęstości oraz „kształt” plazmy),
- Efektywność energetyczna elektrowni,
- Systemy chłodzenia płaszcza i *divertorów*.

Budowa elektrowni termojądrowej wymaga również określenia bezpieczeństwa pracy elektrowni i minimalizacji lub, jeśli to możliwe, całkowitego wyeliminowania negatywnego wpływu produkcji energii termojądrowej na środowisko naturalne. Należy w tym miejscu podkreślić, że bezpieczeństwo pracy elektrowni termojądrowej wynika z niezwykle małej ilości paliwa termojądrowego w reaktorze. W razie jakiegokolwiek awarii, produkcja energii może zostać przerwana w ciągu zaledwie kilku sekund. Również awaria systemów chłodzenia prowadzi do szybkiego zaniku plazmy, spowodowanego zwiększoną emisją zanieczyszczeń z rozgrzanych ścian reaktora. Wspomniane cechy można uznać za „naturalne” zawory bezpieczeństwa elektrowni termojądrowej. Nawet w przypadku poważnej awarii szacowana dawka radiologiczna nie powinna przekroczyć kilkunastu mSv [^{xiv}]. Biorąc pod uwagę powyższe argumenty, wydaje się, że badania nad bezpieczeństwem powinny koncentrować się głównie na problemie wymiany toksycznego berylu ze ścianek wewnętrznych reaktora termojądrowego oraz na bezpiecznym odzyskiwaniu energii z wysokoenergetycznych neutronów. Pozostałe

problemy bezpieczeństwa wymagają raczej stworzenia odpowiednich procedur, niż prowadzenia badań w tej dziedzinie.

W badaniach socjologiczno-ekonomicznych [xv] dość precyzyjnie określono koszty budowy reaktora termojądrowego, jego pracy i utrzymania, produkcji paliwa termojądrowego, jak również późniejszej utylizacji elektrowni termojądrowej. Oszacowany w ten sposób koszt produkcji energii elektrycznej został określony na poziomie 12-38 groszy/kWh (3-9 Eurocentów/kWh) w zależności od osiągniętego w przyszłości postępu technologicznego. Poziom ten jest porównywalny z produkcją energii z innych odnawialnych źródeł energii.

Najważniejszym celem podejmowanych obecnie badań nad energetyką termojądrową w oparciu o tzw. magnetyczne utrzymanie plazmy (MCF) jest dostarczenie kluczowych danych naukowych i technologicznych, które umożliwią budowę prototypu reaktora symulującego pracę elektrowni termojądrowej. Czas realizacji tego celu określono na 30-35 lat. Realizacja tego celu w znacznej mierze opiera się na trzech głównych kierunkach badań:

- Badania związane z reaktorem ITER oraz jego następcą DEMO,
- Badania materiałowe zorientowane na optymalizację parametrów termodynamicznych nisko-aktywacyjnej stali martenzytycznej oraz stopów wolframu w badawczych reaktorach jądrowych, a następnie w powstającym (najprawdopodobniej w Japonii) ośrodku badań materiałowych na potrzeby fuzji termojądrowej (IFMIF),
- Rozwój modeli płaszcza reaktora termojądrowego opartego na nisko-aktywacyjnej stali martenzytycznej z ewentualnymi testami badawczymi w reaktorze ITER.

Budowa tokamaka ITER powinna potwierdzić naukową i technologiczną wykonalność elektrowni opartej na reaktorze termojądrowym. Głównym celem badawczym ITER-a jest wytworzenie i utrzymanie plazmy wysokotemperaturowej, co pozwoli na wytworzenie mocy energetycznej 500 MW. Tak ogromna moc przewyższy po raz pierwszy moc dostarczaną w celu wytwarzania plazmy. Innym ważnym kierunkiem badań, który ma być rozwijany podczas eksploatacji ITER-a jest testowanie technologii i materiałów, które mają być wykorzystywane w przemyśle termojądrowym.

Europejski program badań termojądrowych związany z magnetycznym utrzymaniem plazmy EURATOM realizowany jest przede wszystkim w oparciu o następujące infrastruktury badawcze:

A. Światowy projekt ITER – przyszły badawczy reaktor termojądrowy.

Ponadto program realizowany jest (będzie) w oparciu o następujące uzupełniające infrastruktury badawcze:

- B. Projekt IFMIF – międzynarodowy ośrodek badań materiałowych na potrzeby fuzji termojądrowej,
- C. Europejski projekt JET – największe istniejące obecnie na świecie laboratorium fuzji termojądrowej opartej na magnetycznym utrzymaniu plazmy,
- D. Program towarzyszący (badania na urządzeniach Wspólnoty Euratom)
 - a. Projekt W7-X – powstający największy w Europie stellarator,
 - b. Projekty Tore Supra, ISTTOK, TEXTOR, COMPASS – pozostałe laboratoria fuzji termojądrowej opartej na utrzymaniu magnetycznym plazmy,

- E. W przyszłości program ten zostanie rozszerzony o badania związane z reaktorem demonstracyjnym DEMO.

Podstawowe kierunki badań europejskiego programu strategicznego, który ma doprowadzić do powstania pierwszej komercyjnej elektrowni termojądrowej można również podzielić na grupy tematyczne związane z odpowiednimi, istniejącymi lub planowanym w najbliższej przyszłości infrastrukturami badawczymi. Tabela 14 pokazuje najważniejsze zagadnienia badawcze, które są (będą) realizowane w oparciu o odpowiednie infrastruktury badawcze: opracowanie odpowiednich technologii termojądrowych (*enabling technologies*), badania materiałowe oraz uruchomienie pierwszej elektrowni termojądrowej. Najbliższe czasowo cele badawcze dotyczą rozwoju metod wytwarzania odpowiednich struktur plazmowych (*plasma performance*) oraz rozwoju tych dziedzin fizyki plazmy, które najbardziej ograniczają efektywność energetyczną pracy reaktora termojądrowego. Należy tu wymienić szczególnie ważne kierunki badań związane z zapobieganiem szybkiemu zerwaniu sznura plazmy (*disruption avoidance*) oraz z wytwarzaniem plazmy w reżimie ciągłym (*steady state plasma*). Równie pilne cele badawcze związane są z rozwojem technologii niezbędnej do budowy reaktora badawczego ITER. Dlatego też szczególnie wysoki priorytet powinny mieć w najbliższej przyszłości badania: dużych okresowych obciążeń cieplnych *divertora*, efektów oddziaływania szybkich jonów w plazmie centralnej, procesów powstawania i osłabiania niestabilnych struktur plazmowych (tzw. ELM) czy wreszcie pracy tokamaka w tzw. reżimie niskich momentów obrotowych. Równie wysoki priorytet w tej fazie programu powinny mieć badania nad optymalizacją frakcji wypromieniowania energii w *divertorze*, badania nad efektywnym monitorowaniem „popiołu”, paliwa termojądrowego oraz kontrolą utrzymania trytu.

ITER w pierwszej fazie uruchamiania (około 5 lat) będzie pracował w warunkach plazmy wodorowej lub/i helowej, którą następnie zastąpi plazma deuterowa. Z kolei po wymianie wewnętrznych ścianek węglowych na metaliczne nastąpi przejście do badań nad „docelową” plazmą deuterowo-trytową. Dlatego też szybkie uruchomienie pracy ITER-a oraz sprawne przejście do pracy w warunkach plazmy deuterowo-trytovej wymagać będzie intensywnych badań eksperymentalnych i teoretycznych dla różnych scenariuszy plazmowych (dla plazmy wodorowej, helowej, deuterowej i deuterio-trytovej). Kolejnym, niezwykle ważnym kierunkiem badań termojądrowych w Europie wydaje się rozwijanie najważniejszych metod diagnostycznych, które zostaną zaimplementowane na reaktorze ITER. Należy tu podkreślić szczególną rolę polskich zespołów badawczych, które w sposób szczególny uczestniczą w rozwijaniu diagnostyki plazmy neutronowej i rentgenowskiej. Dlatego też rozwój infrastruktury badawczej związanej z nowoczesnymi źródłami rentgenowskimi i neutronowymi powinien być jednym z priorytetowych punktów strategicznego programu badawczego związanego z energetyką termojądrową.

Tabela 14: Zakres merytoryczny europejskiego programu badań fuzji termojądrowej wraz z odpowiednimi priorytetami do realizacji w oparciu o istniejące (JET i inne laboratoria) oraz przyszłe plazmowe infrastruktury badawcze (ITER, IFMIF, DEMO – faza początkowa działania reaktora oraz późniejsza, pierwsza komercyjna elektrownia termojądrowa). Tabela została zaczerpnięta z raportu [x].

Legenda:		JET i inne laboratoria	ITER / IFMIF	DEMO Faza I/II	Pierwsza elektrownia termojądrowa
Wytwarzanie plazmy	• Zapobieganie szybkiemu zerwaniu sznura plazmy (<i>disruption avoidance</i>)	C	B 0	K K	K
	• Wytwarzanie plazmy w reżimie ciągłym (<i>steady state plasma</i>)	C	B 0	W W	W
	• Divertor / usuwanie wypalonego paliwa termojądrowego	D	B 0	K K	K
	• Zapłon termojądrowy plazmy (<i>burning plasma</i>)	D	B 0	K K	K
	• Plazma we wczesnych fazach wyładowania (<i>start up</i>)	D	B 0	K K	K
	• Wytworzenie plazmy reaktorowej o tzw. dużym współczynniku wzmocnienia energetycznego ($Q>25$)	0	B 0	W K	K
Technologie termojądrowe	• Technologia magnesów nadprzewodzących	C	B 0	K K	K
	• Technologia grzania plazmy, kontroli przepływu prądów	D	C 0	B K	K
	• Technologie diagnostyki i kontroli plazmy reaktorowej	D	C 0	W K	K
	• Kontrola i przetwarzanie trytu	D	B 0	K K	K
	• Zdalna obsługa tokamaka (<i>remote handling</i>)	D	B 0	K K	K
Badania materiałowe	• Charakterystyki i testowanie materiałów dla reaktorów	D	0 B	K K	K
	• Powierzchnie wewnętrznych ścianek reaktora	D	C 0	B A	K
	• Materiały dla płaszcza i <i>divertora</i> reaktora	0	D D	C A	K
Elektrownia termojądrowa	• Samowystarczalność T (trytu)	0	D 0	A K	K
	• Proces licencyjny	D	C D	B A	K
	• Stabilny proces produkcji energii elektrycznej	0	D 0	C A	K
	• Wysoka efektywność / dostępność	0	D D	D B	K

W dalszej fazie europejskiego programu badań nad energetyką jądrową przewidywana jest zmiana priorytetu z badań związanych z projektem ITER na badania związane z pierwszym demonstracyjnym reaktorem termojądrowym DEMO. W tej fazie badań kierunki badań powinny przesuwać się w stronę badań własności materiałów, które będą mogły być zastosowane we wnętrzu reaktora DEMO. Na tym etapie realizacji europejskiego programu termojądrowego spodziewana jest intensyfikacja badań w oparciu o międzynarodowy ośrodek badań materiałowych na potrzeby fuzji termojądrowej (IFMIF). Badania te powinny przyczynić się do opracowania ulepszonego modelu pracy tokamaka oraz stellaratora oraz wytyczyć ścieżkę do końcowego projektu pierwszej komercyjnej elektrowni termojądrowej.

Właściwe przygotowanie projektu reaktora DEMO wymaga osiągnięcia celów badawczych zaplanowanych dla reaktora ITER, w szczególności związanych z pracą w reżimie ciągłym (*steady-state*). Do osiągnięcia tych celów ITER pracując w reżimie ciągłym powinien uzyskać tzw. wzmocnienie energetyczne na poziomie $Q \sim 5-10$. Innym niezwykle ważnym aspektem badań na reaktorze ITER będzie testowanie modułów płaszcza reaktora (*The ITER Test Blanket Module Programme*). Badania te mają kluczowe znaczenie dla właściwego zaprojektowania, budowy i instalacji płaszcza w reaktorze DEMO. Płaszcz taki powinien nie tylko odbierać energię cieplną z wysokoenergetycznych neutronów, lecz dodatkowo zapewnić samowystarczalność trytu poprzez wtórną jego produkcję z reakcji jądrowej $n+Li$. Należy również podkreślić znaczącą potrzebę rozwoju modelowania numerycznego w przewidywaniu warunków plazmowych, zarówno dla ITER-a, jak i reaktora demonstracyjnego DEMO oraz rozwój modelowania numerycznego związanego z rozwojem technologii termojądrowej. Szczegółowe testowanie przewidywań teoretycznych w warunkach plazmy wytwarzanej w reaktorze ITER powinno w sposób istotny przyczynić się do udoskonalenia wielu specjalistycznych kodów numerycznych.

Europejski program badań fuzji termojądrowej zorientowany na reaktory ITER oraz DEMO powinny uzupełniać inne działania badawczo-rozwojowe dostarczające nowych koncepcji teoretycznych, eksperymentalnych i technologicznych. Szczególnie pożądane wydają się następujące kierunki badań:

- Fundamentalna teoria plazmy wysokotemperaturowej, w tym plazmy w warunkach zapłonu termojądrowego,
- Modelowanie utrzymania magnetycznego struktur plazmowych,
- Fizyka plazmy niskotemperaturowej, oddziaływania plazma-ścianka reaktora, pochłanianie wodoru w ściankach reaktora,
- Metody diagnostyczne plazmy wysokotemperaturowej w warunkach plazmy reaktorowej, w tym diagnostyki temperatury jonowej i elektronowej, gęstości elektronowej, diagnostyki neutronowa i cząstek alfa, oraz monitorowanie zanieczyszczeń pochodzących od berylu, węgla, tlenu i wolframu,
- Technologia i fizyka wiązek jonowych,
- Oddziaływanie silnego promieniowania elektromagnetycznego (zwłaszcza w obszarze mikrofal) ze ściankami reaktora termojądrowego,
- Teoretyczne i eksperymentalne badania materiałowe,
- Technologia i fizyka magnesów nadprzewodzących.

Ważnym kierunkiem badań europejskich nad energetyką jądrową jest również rozwój metod związanych z laserową syntezą termojądrową ICF będącej alternatywą do koncepcji magnetycznego utrzymania plazmy. Związany z tymi badaniami projekt HiPER został umieszczony w 2006 roku na Europejskiej Mapie Drogowej dużych infrastruktur badawczych (ESFRI), a w roku 2008 rozpoczęła się faza przygotowawcza tego projektu. Celem projektu jest zademonstrowanie wykorzystania laserów wielkiej mocy i paliwa deuterowiu-trytowego do produkcji energii termojądrowej. Wiązki laserowe zogniskowane na powłoce okalającej paliwo D-T mają doprowadzić do kompresji i zapłonu, dzięki czemu możliwe stanie się uzyskanie temperatury około 100 mln °C umożliwiającej przebieg reakcji termojądrowej. Mimo, że program wspólnoty Euratom obejmuje badania dotyczące koncepcji fuzji laserowej w bardzo ograniczonym stopniu (na ten cel przeznaczane jest obecnie zaledwie około 1% budżetu programu), kierunek ten może w najbliższych latach wzmacniać swoją pozycję.

1.4.1. Udział ośrodków krajowych w międzynarodowym programie badań syntezy termojądrowej

Podstawą udziału polskich naukowców w międzynarodowych badaniach fuzji termojądrowej musi być uczestnictwo w programach realizowanych z wykorzystaniem najnowocześniejszych europejskich struktur badawczych, takich jak JET czy, w najbliższej przyszłości, reaktor badawczy ITER oraz reaktor demonstracyjny DEMO. Wydaje się również, że ważnym elementem polskiego wkładu do europejskiego programu badań termojądrowych mogą w najbliższej przyszłości stać się badania związane z projektem HiPER.

Rozważając możliwości realizacji części międzynarodowego programu badań fuzji jądrowej w polskich ośrodkach naukowych w bliskiej perspektywie czasowej należy uwzględnić fakt, że obecnie Polska *de facto* nie dysponuje żadną dużą infrastrukturą badawczą, która mogłaby realizować bezpośrednio badania dotyczące energetyki termojądrowej. Dlatego też, niezwyklej wagi nabiera zadanie trafnego zdefiniowania obszarów, w których polskie ośrodki badawcze będą mogły aktywnie włączyć się do europejskiego programu badań termojądrowych. Precyzyjne określenie kierunków badań i możliwości budowy odpowiedniej infrastruktury badawczej pozwolą wyznaczyć czytelne perspektywy dla polskich naukowców zajmujących się badaniami związanymi z fuzją termojądrową.

Realizacja części europejskiego programu badań fuzji termojądrowej przez polskie ośrodki naukowe musi bazować na dotychczasowym doświadczeniu. Tabela 15 przedstawia główne kierunki badań realizowane obecnie przez polskie ośrodki naukowe.

Z Tabeli 15 jasno wynika, że w najbliższym czasie realizacja części europejskiego programu fuzji termojądrowej powinna koncentrować się wokół projektów związanych z tokamakami JET i ITER oraz ze stellaratorem W7-X. Uczestnictwo polskich naukowców w kampaniach eksperymentalnych na tokamaku JET powinno służyć przygotowaniu kadr do prowadzenia przyszłych badań na tokamaku ITER. Wiodącymi kierunkami badań związanymi z bezpośrednimi badaniami plazmy termojądrowej wydają się diagnostyki rentgenowska i neutronowa. Dalszemu rozwojowi tych metod diagnostycznych w polskich ośrodkach naukowych musi towarzyszyć budowa odpowiedniej infrastruktury badawczej. W warunkach pracy tokamaka JET a tym bardziej tokamaka ITER nie jest możliwe testowanie nowych systemów diagnostycznych. Dlatego też polskie ośrodki naukowe, które chcą realizować części programu badań termojądrowych związanych z diagnostyką plazmową muszą mieć pełne możliwości testowania urządzeń diagnostycznych w krajowych ośrodkach badawczych.

Tabela 15: Główne kierunki badań realizowane przez polskie ośrodki naukowe zrzeszone w Asocjacji Euratom-IFPiLM w ramach europejskiego programu fuzji termojądrowej. Tabela bazuje na danych raportu rocznego 2008 Asocjacji Euratom-IFPiLM [xvi]

Badania eksperymentalne i modelowanie plazmy w europejskim laboratorium JET	1. Diagnostyka rentgenowska i VUV 2. Aktywacyjna diagnostyka neutronowa 3. Modelowanie numeryczne zagadnień transportu w plazmie
Teoria i modelowanie plazmy komprimowanej polem magnetycznym	4. Dynamika nieliniowa szybkich jonów w okolicach progu niestabilności struktur plazmowych 5. Stochastyczne procesy i ich odwzorowanie w kinetycznych równaniach gazu naładowanych cząstek
Diagnostyka plazmy	6. Spektroskopia miękkiego promieniowania rentge-

	nowskiego za pomocą szybkich detektorów półprzewodnikowych na potrzeby diagnostyki stelaratora W7-X 7. System monitorujący zanieczyszczenia pochodzące od węgla i tlenu na potrzeby diagnostyki stelaratora W7-X 8. Rozwój mikrofalowych metod diagnostycznych 9. Diagnostyka neutronowa i obliczenia transportu neutronów w urządzeniach plazmowych 10. Rozwój detektorów Czerenkowa na potrzeby pomiarów szybkich elektronów – nowa diagnostyka na tokamaku Tore-Supra 11. Zastosowanie śladowych detektorów półprzewodnikowych (SSNTDs) do pomiarów szybkich jonów i produktów fuzji termojądrowej na tokamaku TEXTOR. 12. Zagadnienia erozji i ponownego osadzania komponentów tokamaka TEXTOR sąsiadujących z plazmą
--	---

Inną częścią europejskiego programu termojądrowego, który może i powinien być realizowany przez polskie ośrodki naukowe jest modelowanie numeryczne własności plazmy oraz nowych materiałów, które w przyszłości mogłyby być użyte do budowy komponentów reaktora termojądrowego. Również w tej dziedzinie konieczne są inwestycje związane z zakupem nie tylko sprzętu komputerowego najwyższej klasy lecz również odpowiedniego oprogramowania, takiego jak choćby pakiet IDL, który będzie najprawdopodobniej głównym oprogramowaniem przeznaczonym do analizy danych ITER-a.

Prowadzenie intensywnych badań przez polskie ośrodki naukowe w dziedzinie fizyki plazmy oraz rozwój polskich technologii termojądrowych wymaga znaczącego i zdecydowanego zaangażowania w budowę tzw. kapitału ludzkiego. Bez właściwego kształcenia uniwersyteckiego, inżynierskiego i technicznego nauka polska nie sprosta wyzwaniom związanym z tak dynamicznym rozwojem badań nad energetyką termojądrową. Dlatego też planom związanym z budową odpowiedniej infrastruktury badawczej w Polsce przedstawionym w niniejszym opracowaniu muszą towarzyszyć odpowiednie perspektywy związane z kształceniem młodych naukowców, inżynierów i techników.

1.5. Potrzeby inwestycji w sprzęt badawczy w krajowych ośrodkach naukowych

Dokonany w poprzednich rozdziałach przegląd zaangażowania ośrodków naukowych w prace badawcze związane z fuzją termojądrową jednoznacznie wyznacza polską przestrzeń badawczą w tej dziedzinie. Oczywiście nie oznacza to, że przestrzeń ta jest przestrzenią zamkniętą. Niewątpliwie będzie się ona rozszerzać wraz ze wzrostem zainteresowania projektem energetyki termojądrowej przez inne polskie ośrodki badawcze i specjalistyczny przemysł.

Dotychczasowa przestrzeń badawcza powinna stanowić siłę napędową dla wszystkich nowych inicjatyw w tej dziedzinie. Wiąże się to z koniecznością wzmocnienia infrastrukturalnego tych ośrodków. Dotychczasowe osiągnięcia badawcze, które doprowadziły do „zaistnienia” tych ośrodków na arenie międzynarodowej należy uznać za duży sukces, którego efektów nie wolno zaniedbać. Ten sukces jest w głównej mierze sukcesem intelektualnym wyni-

kającym z silnego potencjału naukowego, który jest chlubą polskiego środowiska badawczego. Za tym sukcesem musi obecnie pójść silne wzmocnienie potencjału badawczego związanego z rozbudową i budową nowych laboratoriów.

Ośrodki badawcze, w których są prowadzone badania w zakresie fuzji nie zaniedbują tego problemu podejmując wszelkie możliwe starania służące poprawie infrastruktury badawczej. Nie pominięto żadnej możliwości, jakie oferują unijne fundusze strukturalne skierowane na rzecz poprawy kondycji nauki polskiej. Jednak bez poparcia i zrozumienia u decydentów na szczeblu ministerialnym starania te są bardzo utrudnione. Dlatego tak ważną sprawą są nie tylko dobrze przygotowane wnioski o finansowanie potrzeb infrastrukturalnych, ale również działania promujące i wyjaśniające szerokim kręgom opiniotwórczym potrzebę zaangażowania się w badania i budowę podstaw dla energetyki termojądrowej.

Polska wraz z innymi krajami członkowskimi UE prowadzi badania nad energetyką termojądrową w ramach wielkich międzynarodowych programów naukowych – ITER i HiPER. Kraj, który nie włączy się wystarczająco do badań nad nowymi rozwiązaniami problemów energetycznych zostanie zepchnięty do roli odbiorcy technologii. Jeżeli Polska nie będzie posiadała odpowiedniego zaplecza infrastruktury naukowej, instytucje naukowe zrzeszone w Asocjacji EURATOM IPPLM staną się tylko podwykonawcami dla krajów, które za-inwestowały w naukę.

Badania w zakresie fuzji i przyszłej energetyki termojądrowej rozwinęły się w Polsce w następujących głównych kierunkach:

1. Bezpośrednie badania syntezy jądrowej. Metody i techniki laserowe dla potrzeb fizyki plazmy komprymowanej polem magnetycznym i utrzymywanej inercyjnie.
2. Korpuskularne i rentgenowskie metody diagnostyki plazmy fuzyjnej. Zagadnienia fizyki produktów reakcji syntezy termojądrowej (neutronów i cząstek alfa) oraz metod ich detekcji w ekstremalnych warunkach reaktora termojądrowego.
3. Inżynieria materiałowa.

Ad.1. Pierwszy wymieniony kierunek stanowi logiczną kontynuację dotychczasowych badań i osiągnięć polskich ośrodków naukowych (Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikro-syntezy w Warszawie, IFPiLM oraz Instytut Problemów Jądrowych im. A. Sołtana w Świerku, IPJ). W ramach IFPiLM działa *International Centre of Dense Magnetized Plasma*, powołane w wyniku porozumienia pomiędzy UNESCO i Państwową Agencją Atomistyki. Główny układ badawczy stanowi tu *Plasma-Focus* (PF-1000) udostępniany także podmiotom zagranicznym w ramach porozumienia *Transnational Access to Major European Facilities*. Niestety, istniejąca obecnie infrastruktura w IFPiLM (łącznie z budynkami laboratoryjnymi) nie spełnia standardów programów międzynarodowych. Działający w IFPiLM akcelerator plazmowy może być zachętą do podejmowania badań w zakresie technologii materiałowych, które będą wykorzystywane w przyszłym reaktorze termojądrowym z magnetycznym utrzymaniem plazmy. Mimo iż akcelerator ten jest jednym z większych na świecie urządzeń tego typu, to jednak jest konstrukcją z przełomu lat 70/80 ubiegłego wieku i nie spełnia wymagań dotyczących zarówno parametrów strumienia plazmy, jak i wyposażenia diagnostycznego wymaganego dla prowadzenia nowoczesnych badań. Sprowadza to Instytut – dysponujący światowej klasy kadrą – do roli podwykonawcy dla podmiotów zagranicznych, które dysponują odpowiednim sprzętem. Aktualnie w Polsce nie istnieje ani jedno laboratorium dysponu-

jące laserami dużej mocy. Warto zauważyć, że laboratoria dużych laserów wielkiej mocy posiadają nie tylko wszystkie duże kraje europejskie, ale także na przykład Republika Czeska.

IFPiLM, jako jedna z kilku placówek badawczych na świecie, dysponuje odpowiednią wiedzą do zbudowania laboratorium akceleratora plazmowego, opartego o **Megaapmerowy Impulsowy Akcelerator Plazmowy** (*Plasma pUlse Megaamper Accelarator - PUMA*), który spełni, założone w projektach europejskich wymagania dotyczące oddziaływania strumienia plazmy ze ścianą komory reaktora. Umożliwi to badania materiałów projektowanych dla tej ściany i projektowanie na podstawie tej wiedzy zupełnie nowych, nieznanych rodzajów materiałów. Kraj, który pierwszy skonstruuje tego typu aparaturę badawczą stanie się na wiele lat faktycznym monopolistą w zakresie badań nad technologiami materiałowymi dla przemysłu termojądrowego. W perspektywie lat będzie to bezcenna technologia, gdyż bez wiedzy o zmianach strukturalnych materiałów, proponowanych dla pierwszej ściany komory reaktora termojądrowego nie da się tegoż reaktora termojądrowego zbudować. Co więcej, akcelerator PUMA przy odpowiedniej konfiguracji zdolny będzie wytwarzać impulsowe gorące struktury plazmowe dochodzące do kilkudziesięciu milionów stopni °C (temperatura plazmy generowanej w akceleratorze PUMA kilkakrotnie przewyższy tę uzyskiwaną obecnie w oparciu o urządzenie *Plasma Focus* PF-1000). Takie struktury plazmowe charakteryzują się ogromnymi strumieniami neutronów i silnym promieniowaniem rentgenowskim w szerokim zakresie energetycznym. Dlatego też, powstanie takiej infrastruktury w Polsce pozwoli na dynamiczny rozwój badań związanych z oddziaływaniem plazma-ścianka oraz na rozwój technologii diagnostycznych dla przyszłych reaktorów termojądrowych.

Intensywna wiązka lasera dużej mocy w oddziaływaniu z tarczą stałą generuje intensywne wiązki szybkich elektronów i jonów. Ważnym zastosowaniem takich wiązek elektronów, a także jonów przyspieszanych laserem jest wykorzystywanie ich do tzw. „szybkiego zapłonu” paliwa termojądrowego (D-T) skompresowanego wstępnie wiązkami innego wielkiego lasera wielowiązkowego naświetlającego sferycznie mikrokapsułę z takim paliwem. Optymalizowane są jednocześnie dwie opcje „szybkiego zapłonu” jedna, obecnie preferowana, wykorzystująca wiązkę szybkich elektronów druga wykorzystująca strumień szybkich jonów (protonów). Wykorzystanie efektu „szybkiego zapłonu” jest podstawą europejskiego programu HiPER. Znaczącym wkładem infrastrukturalnym do tego kierunku badań powinno być, planowane do realizacji w IFPiLM, **„Laboratorium laserów wielkiej mocy dla zastosowań energetycznych i technologicznych”** wyposażone w laser pikosekundowy oraz femtosekundowy. Pierwszy z nich (o mocy ~50 TW w impulsie ~1 ps) będzie służyć do optymalizacji inicjowania syntezy termojądrowej wiązką protonów przyspieszanych tym laserem (tzw. „szybki zapłon protonowy”). Badania te są objęte w większości projektem HiPER.

W dziedzinie urządzeń badawczych wytwarzających plazmę o parametrach termojądrowych już od połowy lat 1960-tych w Świerku (obecnie IPJ) prowadzone były prace na wysokonapięciowych i wysokoprądowych układach impulsowych typu *Plasma-Focus*. Są to układy do impulsowego wytwarzania plazmy, w których badania zjawisk zachodzących w gęstej, namagnetyzowanej plazmie były prowadzone już od początku lat 1950-tych w wielu laboratoriach na całym świecie. W drugiej połowie lat 1970-tych i w latach 1980-tych w Świerku zaprojektowano i wykonano prototypowy układ PF-360 oraz elementy jednego z trzech największych na świecie układów typu *Plasma Focus* – układu PF-1000. W IPJ opracowano także koncepcję oryginalnego w skali światowej prętowego iniektora plazmowego RPI z impulsowym napuszczaniem gazu, znajdującego zastosowanie między innymi do implantacji jonów w różne materiały. Metoda ta doprowadziła do uzyskania znaczących osiągnięć w tworzeniu półprzewodnikowych ogniw fotowoltaicznych. Od połowy lat 1980-tych prowadzono też prace związane z toroidalnymi układami z magnetycznym utrzymaniem plazmy typu tokamak. Pakiet wybranych zagadnień teoretycznych realizowanych w IPJ

obejmuje badania włókien prądowych w wyładowaniach typu *Plasma-Focus* oraz ich wpływu na emisję szybkich deuteronów i protonów. Innym tematem z tego zakresu jest modelowanie numeryczne dynamiki plazmy w układach impulsowych.

Ad.2. Plazma fuzyjna jest źródłem promieniowania elektromagnetycznego i korpuskularnego. W skład tego ostatniego wchodzi wiązki relatywistycznych elektronów, wiązki jonów gazu roboczego (np. deuteru) jak i jonów zanieczyszczeń oraz jonów wprowadzanych domieszek, a także produkty reakcji syntezy (fuzji) D-D, z których najbardziej interesujące są szybkie neutrony, cząstki α i szybkie protony. W IPJ rozwijane były i są nadal wybrane metody diagnostyki plazmy wysokotemperaturowej. Prowadzone są badania strumieni plazmowych oraz ich oddziaływanie na materiał tarcz, obejmujące analizę spektroskopową linii jonów gazu roboczego i jonów materiału elektrod. W ramach diagnostyki korpuskularnej rozwijana jest technika spektrometrii masowej Thomsona, wykorzystywana do pomiarów rozkładu masowego i energetycznego impulsowych strumieni jonów. Zadania związane z diagnostyką plazmy w układach typu tokamak wykonywane są w ramach programu syntezy jądrowej EURATOM. Prace obejmują badanie wiązek elektronowych, pomiary emisji szybkich jonów i neutronów przy wykorzystaniu detektorów śladowych oraz pomiary strumienia i widma neutronów metodami aktywacyjnymi. Badania wiązek elektronowych oparte są na wykorzystaniu zjawiska Czerenkowa. Zbudowano szereg wielokanałowych detektorów do pomiarów szybkich elektronów w różnych zakresach energii. Detektory te przeznaczone są do eksperymentów zarówno w średnich układach (takich jak tokamak CASTOR w Pradze i ISTTOK w Lizbonie, a w najbliższej przyszłości COMPASS w Pradze), jak i w dużym układzie toroidalnym Tore Supra w Cadarache we Francji. Innym kierunkiem badawczym jest wykorzystanie dielektrycznych detektorów śladowych (SSNTD) do pomiarów emisji szybkich jonów (m.in. protonów i deuteronów) oraz neutronów emitowanych z różnych układów eksperymentalnych: tokamaka TEXTOR w Jülich w Niemczech, układów *Plasma-Focus* oraz układu z laserem neodymowym 15-J w Palaiseau we Francji. Prowadzone są także aktywacyjne pomiary neutronowe na największym tokamaku JET w Culham w Wielkiej Brytanii, których celem jest oszacowanie strumienia i widma neutronów.

Pięćdziesięcioletnie doświadczenia w prowadzeniu badań plazmowych uzasadniają sensowność inwestycji w zakresie fizyki plazmy, badań syntezy (fuzji) jądrowej oraz w obszarze nowych technologii. Najważniejszą inwestycją w sprzęt badawczy w IPJ w zakresie bezpośrednich badań związanych z syntezą jądrową powinno być utworzenie „**Laboratorium korpuskularnej i rentgenowskiej diagnostyki plazmy**”, co znacząco zwiększyłoby udział IPJ w bezpośrednich badaniach syntezy (fuzji) jądrowej. Podstawowym źródłem promieniowania korpuskularnego i rentgenowskiego w takim Laboratorium powinien być układ impulsowy DMP (*Dense Magnetized Plasma*) o energetyce zasilania rzędu 400 kJ, wyposażony w odpowiednią komorę próżniową wraz z nowoczesnym osprzętem. W Laboratorium rozwijane byłyby badania metodami pasywnej diagnostyki korpuskularnej jonów i elektronów uciekających z plazmy, a także emitowanych później produktów reakcji syntezy posiadających ładunek elektryczny: p, T, ^3He i cząstek α , które dostarczają informacji nie tylko o parametrach plazmy, ale także o skuteczności jej utrzymania. W wypadku jonów pierwotnych (których źródłem jest gaz roboczy - a więc deuter lub wodór) jako najbardziej interesujące pasywne metody diagnostyczne należy rozpatrywać: sondy Langmuira, kolektory typu Faraday’a, otwarte fotopowielacze pracujące jako konwertery jon-elektron, detektory scyntylacyjne i detektory śladowe. W przypadku produktów reakcji syntezy jądrowej są to różnego rodzaju analizatory, a w szczególności analizatory elektrostatyczne i analizatory typu Thomsona. Do metod diagnostycznych pomiarów szybkich elektronów można zaliczyć: konwertery elektrony –

promieniowanie X, filmy rentgenowskie, folie plastikowe czule na dozę elektronów oraz detektory oparte na efekcie Czerenkowa. Badanie spektrum energetycznego tych pierwotnych elektronów jest możliwe dzięki zastosowaniu analizatorów magnetycznych i wielokanałowych analizatorów typu Czerenkowa. Pomiary produktów reakcji syntezy jądrowej posiadających ładunek elektryczny dostarczają także bardzo ważnych informacji o wydajności tejże reakcji. Do tego typu pomiarów można stosować odpowiednie detektory śladowe i analizatory. Wśród naładowanych produktów reakcji syntezy jądrowej najważniejsze wydają się być obecnie cząstki α i protony. Pomiary czasowe tych cząstek będą umożliwiały detektory scyntylacyjne, detektory diamentowe typu CVD (przy wykorzystaniu doświadczeń i współpracy z IFJ PAN w Krakowie) oraz ewentualnie diody barierowe. Badania promieniowania rentgenowskiego umożliwiają ocenę stopnia zanieczyszczenia plazmy (linie spektralne domieszek), a także dają możliwość oceny lokalnych parametrów plazmy, takich jak temperatura elektronowa i jonowa. Do tego typu pomiarów używane są odpowiednie spektrografy rentgenowskie. Metody diagnostyki rentgenowskiej wymagają jednak dalszych ulepszeń.

Fizyka transportu neutronów i ich detekcja, a także metody detekcji promieniowania jonizującego (np. cząstki alfa) stanowią silnie zakorzenioną domenę badań naukowych w IFJ PAN. W tym Instytucie został zbudowany (działający do dzisiaj) jedyny w Polsce impulsowy generator neutronów prędkich produkujący neutrony o takich samych energiach jak w reakcji syntezy D-T. Doświadczenie w pracy eksperymentalnej z impulsowymi polami neutronów stanowią unikalną bazę badawczą nie tylko w Polsce. Niewiele jest ośrodków na świecie, które utrzymują obecnie dobrze wyposażone laboratoria neutronowe dla zakresu energii neutronów, z którymi mamy do czynienia w procesie syntezy.

Instytut Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie, opierając się na swoich dotychczasowych doświadczeniach i osiągnięciach z zakresu badań i nowatorskich rozwiązań w dziedzinie pomiarów strumieni neutronowych w różnorodnych zagadnieniach aplikacyjnych, ma pełne podstawy, aby stać się **centrum rozwoju metod detekcji neutronów dla syntezy termojądrowej**. W reaktorze, działającym w oparciu o syntezę termojądrową, w gorącej plazmie są generowane neutrony pełniące szczególną rolę: 1) są nośnikiem energii, którą wykorzysta się do wytworzenia energii elektrycznej, 2) niosą informację o stanie plazmy, tj. o aktualnych warunkach pracy urządzenia, dając podstawę do sterowania procesem. Stąd nowe, dedykowane dla syntezy termojądrowej precyzyjne metody detekcji neutronów i diagnostyki neutronowej plazmy są w centrum zainteresowania budowniczych i przyszłych użytkowników reaktorów plazmowych, takich jak tokamak ITER, stellarator Wendelstein 7-X, itp.

Impulsowy generator neutronów prędkich pracujący w IFJ PAN jest urządzeniem *home made*, którego początki sięgają lat 60-tych. Mimo kilkukrotnych modernizacji jest już urządzeniem przestarzałym i niewystarczającym do realizacji nowoczesnych projektów, które wymagają innych parametrów pracy oraz bardzo dobrej powtarzalności pomiarów.

IFJ PAN podjął już ważną inwestycję wyposażając swoje laboratorium neutronowe w 2009 roku w nowe źródła neutronowe działające na bazie zjawiska *pinchu*. Na nowych stanowiskach pomiarowych przy tych źródłach będą testowane systemy spektrometrycznej detekcji neutronów metodą czasu przelotu, układy detekcji neutronów oparte o scyntylacyjne detektory punktowe (SOF), systemy aktywacyjne i systemy detekcji neutronów opóźnionych z aktywacji. Jest to pierwszy krok do budowy nowoczesnego laboratorium neutronowego. Aby ten wysiłek nie poszedł na marne warto ten rozwój wzmocnić i przyspieszyć. Wyposażenie IFJ PAN w kolejne stanowiska z monoenergetycznymi źródłami neutronowymi o dużej wydajności i specyficznych parametrach pracy (m.in. z kanałem pomiarowym dla cząstek alfa

z reakcji D-T) pozwoli tej Instytucji stać się wiodącym **centrum rozwoju metod detekcji neutronów i cząstek alfa dla syntezy termojądrowej**.

Ad.3. Urządzenia energetyki termojądrowej wymagają zastosowania materiałów o wysokiej odporności na bombardowanie wiązkami neutronów i jonów w warunkach wysokich temperatur. Opracowanie takich materiałów jest przedmiotem aktualnych badań inżynierii materiałowej prowadzonych w licznych laboratoriach. W realizowanych metodach badawczych niezbędne jest wytworzenie warunków precyzyjnej symulacji imitujących przyszłe zastosowania opracowywanego materiału. W wielu aspektach do celów tych nadają się idealnie wiązki jonowe i impulsowe wiązki plazmowe. Ścianki komory eksperymentalnego reaktora termojądrowego ITER będą bombardowane impulsowo strumieniami neutronów, deuteronów, trytonów i cząstek α . Problemem badawczym jest znalezienie materiałów, które są w stanie utrzymać i zachować swoje właściwości konstrukcyjne w okresie długotrwałego bombardowania. Badania prowadzone w laboratoriach pozwalają na wykorzystanie wiązek jonowych w/w gazów do określenia ich wpływu na powierzchniową warstwę materiału. Ponadto impulsowy charakter wytwarzanych wiązek plazmowych pozwala lepiej symulować warunki panujące w komorze reaktora termojądrowego, ponieważ umożliwia określenie wpływu wiązki plazmowej w warunkach impulsowo podwyższonej temperatury – dokładnie tak, jak to ma miejsce w rzeczywistym urządzeniu. Temperatura bombardowania wiązką jonową ma głęboki wpływ na jego efekty, np. stopień absorpcji wodoru i deuteru w materiale i poziom jego nasycenia jest silnie-zmienną funkcją tej temperatury. Z drugiej strony poziom ten determinuje zmiany właściwości mechanicznych materiału, np. kruchości czy twardości.

Istotnym wkładem infrastrukturalnym do tego kierunku badań powinno być **Laboratorium Rozwoju Technologii Materiałowych dla Energetyki Termojądrowej** skupione wokół układu PUMA lub wspomniane wcześniej, **Laboratorium laserów wielkiej mocy dla zastosowań energetycznych i technologicznych** w IFPiLM. Planowany do zainstalowania laser femtosekundowy będzie służył realizacji badań wykonywanych przy bardzo wysokich gęstościach mocy wiązki laserowej – badania w większości objęte międzynarodowymi projektami HiPER i ELI. Laser ten powinien posiadać moc co najmniej rzędu 100 TW, aby umożliwić uzyskiwanie gęstości mocy rzędu 10^{20} W/cm².

Również IPJ podjął intensywne starania o rozwój infrastruktury badawczej dla potrzeb badań materiałowych w ekstremalnych warunkach plazmy fuzyjnej. Rozpoczęto prace nad uruchomieniem „**Laboratorium wiązek jonowo-plazmowych**”. Znaczącą część środków finansowych przeznaczonych na ten cel uzyskano w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka (RPO IG, 2010-2013) dla województwa mazowieckiego. Źródłem wiązek plazmowo-jonowych w tym Laboratorium będzie nowe urządzenie prętowego iniektora plazmowego typu RPI, wyposażonego w generator nowej generacji oraz nowy osprzęt próżniowy. Dodatkowo laboratorium będzie wyposażone w nowy implantator wysokoprądowy z wyposażeniem, spektrometr GDOS (*glow discharge optical spectrometry*) oraz mikroskop skaningowy. Niezbędne byłoby doposażenie tego laboratorium w system analizy termogravimetrycznej (TGA).

Niezależnie od badań nad materiałami dla energetyki termojądrowej „Laboratorium wiązek jonowo-plazmowych” może zaoferować zaawansowane badania nad materiałami dla potrzeb nowoczesnej energetyki jądrowej, w której postęp w dziedzinie wprowadzania nowych, bardziej ekonomicznych reaktorów jądrowych wymaga również opracowania materiałów o podwyższonej odporności na uszkodzenia radiacyjne w wysokich temperaturach. Jest to również tematyka, którą z powodzeniem można rozwijać przy wykorzystaniu posiadanych urządzeń technicznych – implantatorów jonów i generatorów wiązek plazmowych.

Kolejnym projektem IPJ jest zbudowanie, wyposażenie i uruchomienie „**Laboratorium jonowych technik analizy i modyfikacji materiałów**” opartego na wykorzystaniu akceleratora typu tandem. Zadaniem tego laboratorium będzie prowadzenie badań z zakresu analizy i modyfikacji materiałów wysokoenergetycznymi wiązkami jonów. Projekt obejmuje także budowę odpowiedniego budynku laboratoryjnego, wraz z wyposażeniem niezbędnym do funkcjonowania takiego urządzenia. Wystąpienie o środki finansowe (na część planowanego Laboratorium) skierowane do MNiSW w ramach PO IG, działanie 2.1 na lata 2010 - 2012 miało miejsce w maju 2009 i projekt ten jest obecnie w fazie oceny merytorycznej. Realizacja tego projektu umożliwi IPJ prowadzenie rozległych badań naukowych i prac wdrożeniowych, z zakresu analizy i modyfikacji materiałów, stosowanych w nowoczesnej technologii, a zwłaszcza w inżynierii materiałowej, mikro- i opto-elektronice. Kolejnym z wiodących zastosowań tego akceleratora będą badania nad nowymi materiałami, a w tym w tym: ilościowe pomiary rozkładów głębokościowych pierwiastków, ilościowe pomiary stopnia zdefektowania kryształów i ilościowe pomiary składu pierwiastkowego materiałów. Urządzenie to, umożliwi również modyfikację warstwy wierzchniej materiałów o grubości do ok. 10 mikrometrów wysokoenergetycznymi wiązkami jonów.

Warto zwrócić uwagę na fakt, że wymienione powyżej instytucje badawcze łączą wspólne projekty i przedsięwzięcia naukowo-badawcze. Instytucje te zadeklarowały długofalową współpracę mającą na celu rozwój i promocję polskiego sektora badań termojądrowych ustanawiając w 2009 roku **Konsorcjum Naukowe „Technologie Materiałowe dla Energetyki Termojądrowej”**. Prace badawcze, które będą realizowane na bazie nowoczesnej infrastruktury (o której mowa powyżej) w różnych kierunkach w kilku polskich instytutach, są wobec siebie komplementarne i będą stanowiły wspólny wkład do europejskiego programu syntezy termojądrowej.

1.6. Podsumowanie i rekomendacje

Podsumowując należy stwierdzić, że infrastruktury badawcze w Europie i na świecie w zakresie urządzeń wytwarzających plazmę są niezwykle różnorodne i nadal bardzo dynamicznie rozwijane. Urządzenia obecnie eksploatowane bądź znajdujące się w fazie projektowania czy konstruowania pozwalają na prowadzenie badań w praktycznie wszystkich dziedzinach niezbędnych dla rozwoju energetyki termojądrowej. Gorzej natomiast jest, jeśli pod uwagę weźmie się centra technologiczne i ośrodki obliczeniowe. Tutaj zarówno w opinii autorów niniejszego opracowania jak i ekspertów europejskich potrzebne są inwestycje infrastrukturalne. Bez tych inwestycji rozwój energetyki termojądrowej może opóźnić się o wiele lat.

Potrzeby inwestycji infrastrukturalnych wskazywane są w takich obszarach jak (1) dedykowane centra obliczeniowe dla programu energetyki termojądrowej, (2) badania elementów nadprzewodzących systemów magnetycznych reaktorów, (3) badania materiałów ściany reaktora przy pomocy wysokoenergetycznych wiązek plazmy, jonów i elektronów, (4) napromieniowywanie materiałów wiązkami neutronów o odpowiedniej energii i intensywności, (5) badania materiałów napromieniowanych oraz (6) badania cyklu paliwowego z wykorzystaniem trytu.

Jak przedstawiono w niniejszej ekspertyzie istnieje w Polsce znaczący potencjał naukowy w zakresie badań fuzji termojądrowej. Natomiast infrastruktura znajdująca się w polskich ośrodkach badawczych jest znacznie uboższa i wymaga niewątpliwie rozwoju dla skutecznego prowadzenia prac badawczych przez krajowe zespoły naukowców. Infrastruktura badawcza dostępna w krajowych ośrodkach naukowych obejmuje:

- Jedno urządzenie do wytwarzania plazmy o parametrach termojądrowych (PF-1000),
- Aparaturę diagnostyczną do pomiaru podstawowych parametrów plazmy (temperatura, gęstość, czas utrzymania), jej struktury przestrzennej i zmienności parametrów w czasie, a także do pomiarów emitowanych przez plazmę strumieni cząstek i promieniowania,
- Aparaturę służącą do badań *post-mortem* skutków oddziaływania gorącej plazmy z różnymi materiałami proponowanymi na pierwszą ściankę reaktora termojądrowego z tym, że badania te ograniczają się do badań materiałów nienapromieniowanych.

Mimo, że brak jest w kraju urządzeń wytwarzających plazmę w oparciu o tokamak, czy stellarator, w opinii autorów budowa infrastruktury badawczej o skali porównywalnej z JET lub ITER (z budżetem kilku mld Euro) nie wydaje się w Polsce zasadna. Jak wynika z przedstawionego planu rozwoju infrastruktury europejskiej (patrz Rys. 13) nie przewiduje się tego rodzaju inwestycji w Europie poza rozwojem projektów ITER; JET i W7-X (oraz do pewnego stopnia ASDEX-U).

Dlatego też wątpliwa wydaje się perspektywa budowy w Polsce tokamaka lub stellaratora nawet mniejszej skali. Niemniej jednak w dalszej perspektywie czasowej, 10-20 lat, może dojść do kluczowych decyzji związanych z budową dużej infrastruktury badawczej w Polsce przeznaczonej do realizacji bezpośrednich badań nad energetyką termojądrową, takich jak reaktor termojądrowy czy laser wielkiej mocy. Jednak tego typu inwestycje z pewnością będą inwestycjami ponadnarodowymi. Wybór takiej inwestycji będzie uzależniony od kierunku rozwoju badań fuzyjnych na świecie i sytuacji ekonomicznej, na co będą miały wpływ:

- Wyniki europejskich badań związanych z rozpoczętymi projektami ITER, stellarator WX-7 oraz projekt HiPER, a z pewnością również wyniki osiągnięć światowych w tej dziedzinie badań,
- Stopień przygotowania odpowiednich kadr naukowych i inżynierskich w Polsce,
- Pozyskanie poparcia znacznej liczby ośrodków naukowych w Polsce i Europie dla danej inwestycji oraz wsparcie pozarządowe,
- Stopień rozwoju energetyki jądrowej w Polsce,
- Czynniki ekonomiczne związane z finansowaniem dużych infrastruktur badawczych w Polsce i Europie.

Natomiast rozwój infrastruktury krajowej powinien być ukierunkowany na centra diagnostyczne, technologiczne i obliczeniowe wyposażone w odpowiednią aparaturę pomiarową. W tym kontekście należy zauważyć, że obecnie istniejąca w kraju infrastruktura tego typu stanowczo wymaga unowocześnienia i uzupełnienia. W tym celu potrzebna jest realizacja inwestycji infrastrukturalnych, o które jednostki uczestniczące w krajowym programie badań energetyki termojądrowej wnioskowały w ramach różnych inicjatyw, a mianowicie zrealizowanie projektów:

1. **Megaamperowy Impulsowy Akcelerator Plazmowy PUMA** (*Plasma pUlse Megaamper Accelarator*), służący w zależności od konfiguracji do produkcji impulsowej gorącej plazmy termojądrowej lub strumienia plazmy niskotemperaturowej oddziałującej ze ścianami komory przyszłego reaktora termojądrowego,
2. **Laboratorium neutronowe** wyposażone w stanowiska z monoenergetycznymi źródłami neutronowymi o dużej wydajności i specyficznych parametrach pracy (m.in. z kanałem pomiarowym dla cząstek alfa z reakcji D-T),
3. **Laboratorium korpuskularnej i rentgenowskiej diagnostyki plazmy,**
4. **Laboratorium laserów wielkiej mocy** dla zastosowań energetycznych i technologicznych wyposażone w laser pikosekundowy oraz femtosekundowy,
5. **Laboratorium jonowych technik analizy i modyfikacji materiałów.**

Oprócz proponowanych inwestycji warto rozważyć wydaję się przygotowanie badawczego reaktora jądrowego **MARIA** do badań materiałowych zorientowanych na optymalizację parametrów termodynamicznych nisko-aktywacyjnej stali martenzytowej oraz stopów wolframu na potrzeby fuzji termojądrowej. Badania w tym obszarze posiadają wysoki priorytet w europejskim programie EURATOM.

Proponowane w niniejszej ekspertyzie duże infrastruktury badawcze, dość dobrze pokrywają mapę głównych obszarów badawczych zdefiniowanych w europejskim programie badań termojądrowych EURATOM. Obszary te wraz z proponowanymi inwestycjami oraz z instytucjami wiodącymi przedstawia Tabela 16. W przyszłości plany te mogą ulec modyfikacjom. W szczególności przyszły sukces badań nad energetyką termojądrową w oparciu o metodę ICF, które rozwijane są dynamicznie poza Europą, może zmienić akcenty w priorytetach badań europejskich.

Pozycja Polski, jako ważnego partnera w realizowanych obecnie i w przyszłości europejskich i światowych programach badawczych (niezależnie od ich modyfikacji czy zmiany

priorytetów), będzie niewątpliwie znacznie silniejsza, jeśli już teraz podejmie się zdecydowane kroki do wzmocnienia potencjału badawczego w zakresie budowy i wyposażenia odpowiedniej infrastruktury naukowej przeznaczonej do badań nad plazmą i fuzją wysokotemperaturową.

Tabela 16: Proponowane inwestycje w polskich ośrodkach naukowych realizujących badania nad energetyką termojądrową w poszczególnych grupach infrastruktur badawczych.

Rodzaj infrastruktury	Nazwa infrastruktury	Jednostka wiodąca
Wytwarzania plazmy o parametrach termojądrowych	• Megaapmerowy Impulsowy Akcelerator Plazmowy PUMA	IFPiLM
	• Laboratorium Laserów Wielkiej Mocy	IFPiLM
Oddziaływania plazma-ścianka reaktora termojądrowego	• Megaapmerowy Impulsowy Akcelerator Plazmowy PUMA	IFPiLM
Diagnostyka plazmy i oddziaływania produktów syntezy (neutronów, cząstek alfa) z materiałami	• Megaapmerowy Impulsowy Akcelerator Plazmowy PUMA	IFPiLM
	• Laboratorium Korpuskularnej i Rentgenowskiej Diagnostyki Plazmy	IPJ
	• Centrum Rozwoju Metod Detekcji Neutronów dla Syntezy Termojądrowej	IFJ
Badania materiałowe	• Megaapmerowy Impulsowy Akcelerator Plazmowy PUMA	IFPiLM
	• Centrum Rozwoju Metod Detekcji Neutronów dla Syntezy Termojądrowej	IFJ
	• Laboratorium Wiązek Jonowo–Plazmowych	IPJ

.....
Łukasz Ciupiński

.....
Jacek Rzakiewicz

.....
Marek Scholz

.....
Urszula Woźnicka

30 października, 2009

Wykaz skrótów

CRPP	<i>Centre de Recherches en Physique des Plasmas</i> w Szwajcarii, Villigen
GLADIS	Akcelerator jonów pracujący w Instytucie Fizyki Plazmy w Garching
DEMO	<i>DEMONstration Power Plant</i>
EFDA	<i>European Fusion Development Agreement</i>
ELI	<i>Extreme Light Infrastructure</i>
FIREX	<i>Fast Ignition Realization Experiment, Institute of Laser Engineering, Osaka, University, Japan</i>
HiPER	<i>High Power Laser Energy Research facility</i>
ICF	Inercyjne utrzymanie plazmy (ang. <i>Inertial Confinement Fusion</i>)
ICRH	Grzanie plazmy przy pomocy mikrofal
IFJ PAN	Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego PAN w Krakowie
IFMIF	<i>International Fusion Materials Irradiation Facility</i>
IFPiLM	Instytut Fizyki Plazmy Laserowej Mikrosyntezy w Warszawie
IPJ	Instytut Problemów Jądrowych im. Sołtana w Świerku
ITER	<i>International Thermonuclear Experimental Reactor</i>
JET	<i>Joint European Torus</i>
LMJ	<i>Laser Mégajoule</i> , laser wielkiej mocy budowany w Bordeaux we Francji, przez <i>French Atomic Energy Commission, CEA</i>
MCF	Magnetyczne utrzymanie plazmy (ang. <i>Magnetic Confinement Fusion</i>)
NBI	Grzanie plazmy metodą wiązką neutralnych cząstek (ang. <i>neutral beam injection</i>)
NIF	<i>National Ignition Facility, USA</i>

Źródła:

- i <http://www.energetykatermojadrowa.pl/>
- ii http://www.energetykatermojadrowa.pl/index.php?option=com_content&view=article&id=57:ekspertyzyanalizy&catid=50:ekspertyzy&Itemid=71
- iii <http://www.iter.org/default.aspx>
- iv <https://lasers.llnl.gov/>
- v <http://www-lmj.cea.fr/>
- vi <http://www.hiper-laser.org/>
- vii Stephen O. Dean, The Rationale for an Expanded Inertial Fusion Energy Program, J Fusion Energy (2008) 27:149–153
- viii Carlos Varandas, EURATOM strategy towards fusion energy, Energy Conversion and Management 49 (2008) 1803–1809
- ix Cost sharing for all phases of the ITER project, <http://www.mofa.go.jp/POLICY/treaty/submit/session166/agree-2-2.pdf>
- x R&D Needs and Required Facilities for the Development of Fusion as an Energy Source, © European Communities, 2008, http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/978-92-79-10057-4_en.pdf
- xi <http://www.toodlepip.com/tokamak/>
- xii A. Masiello et al. European programme towards the 1MeV ITER NB injector, Fusion Engineering and Design 84 (2009) 1276–1280
- xiii D. Maisonnier, I. Cook, P. Sardain, R. Andreani, L. Di Pace, R. Forrest, L. Giancarli, S. Hermsmeyer, P. Norajitra, N. Taylor, D. Ward, “Final Report of the European Fusion Power Plant Conceptual Study (PPCS)”, EFDA(05)-27/4.10, Kwiecień 2005
- xiv D. Maisonnier, I. Cook, P. Sardain, R. Andreani, L. Di Pace, R. Forrest, L. Giancarli, S. Hermsmeyer, P. Norajitra, N. Taylor, D. Ward, “Final Report of the European Fusion Power Plant Conceptual Study (PPCS)”, EFDA(05)-27/4.10, Kwiecień 2005
- xv “Socio-economic aspects of fusion power”, EUR (01) CCE-FU 10/6.2.2, Kwiecień 2001
- xvi Annual Report 2008, Asocjacja Euratom-IFPiLM