

PROGNOZA UDZIAŁU POLSKI W ROZWOJU BADAŃ I TECHNOLOGII TERMOJĄDROWYCH DLA POTRZEB ENERGETYCZNYCH

Autorzy opracowania:

Jan Badziak

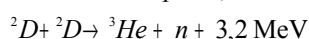
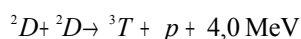
Marek Scholz

Jerzy Wołowski

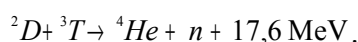
1. WSTĘP

Od lat 30-tych ubiegłego wieku wiadomo, że energia jądrowa może być wydzielana nie tylko w reakcjach rozszczepienia ciężkich jąder atomowych, ale również w reakcjach syntezy lekkich jąder. Przykładem są reakcje zachodzące na Słońcu, gdzie w wyniku łączenia się czterech protonów w jądro helu wydziela się energia. Ta wydzielona energia jest wynikiem defektu masy czyli różnicy mas między produktem reakcji czyli jądrem helu, a substratami czyli czterema protonami, których łączna masa jest większa od masy jądra helu. Ta różnica mas zamienia się na energię i w takim cyklu reakcji wydziela się ok. 26 MeV energii co daje z 1 g wodoru ok. $6 \cdot 10^5$ MJ. Prawdopodobieństwo zajścia takiej reakcji syntezy jest bardzo małe, ale proces może przebiegać przez szereg reakcji pośrednich. Mimo to, we wnętrzu Słońca, w ciągu roku tylko jedno jądro na milion powstaje w drodze takich reakcji, ale ze względu na rozmiary Słońca wystarcza to do utrzymania jego temperatury, przy olbrzymiej ilości wypromieniowanej energii. W gorących wnętrzach gwiazd mogą również przebiegać reakcje syntezy z udziałem jąder innych lekkich pierwiastków, np. litu, berylu i boru. Wymienione reakcje syntezy zachodzą w bardzo wysokiej temperaturze, w stanie równowagi termodynamicznej i stąd nazywane są reakcjami termojądrowymi.

Zrozumienie procesów związanych z produkcją energii jądrowej w gwiazdach doprowadziło do poszukiwania reakcji syntezy jądrowej, które można zrealizować w ziemskich warunkach. Ze względu na przekrój czynny stosunkowo prosto można przeprowadzić reakcje syntezy jąder ciężkich izotopów wodoru deuteru:



lub deuteru i trytu:



Reakcje są możliwe tylko wtedy jeśli zderzające się ze sobą jądra mają energię wystarczającą do pokonania bariery potencjału kulombowskiego. Można powiedzieć, przez analogię do procesu spalania chemicznego, że dla połączenia – syntezy jąder atomowych, musi zostać przekroczona „temperatura zapłonu”. Z tym, że w tym przypadku temperatura zapłonu wynosi ok. 10 keV ($1 \text{ eV} \approx 10^4$). W tej temperaturze materia występuje w postaci plazmy, czyli całkowicie zjonizowanego gazu. Taka gorąca plazma intensywnie wypromieniowuje energię, ale przy wzroście temperatury wydajność reakcji syntezy jądrowej gwałtownie rośnie w wyniku czego energia uwalniana w wyniku tych reakcji przekracza straty energii na promieniowanie. Temperatura przy której szybkość wydzielania energii w reakcjach jądrowych przekracza straty na promieniowanie plazmy nosi nazwę temperatury zapłonu reakcji termojądrowych. Dla plazmy deuterowej wynosi ona ok. 350 mln stopni, a dla plazmy deuterowo-trytowej ok. 45 mln stopni.

Reakcje syntezy jądrowej były realizowane powszechnie w laboratoriach fizyki jądrowej poprzez przyspieszanie deuteronów do dużych energii w akceleratorach i bombardowanie nimi tarcz zawierających deuter lub tryt. Tak wywołane reakcje syntezy zachodzą bez osiągnięcia warunków równowagi termodynamicznej i nie można ich nazwać reakcjami termojądrowymi, a wydzielana w takich warunkach (wiązka – tarczach) energia jest mniejsza od energii potrzebnej do akceleracji deuteronów wiązki. Dążąc do pozyskania nowego źródła energii na bazie reakcji syntezy jądrowej, fizycy podjęli próby realizacji reakcji termojądrowych w warunkach ziemskich.

Na początku lat 50 ubiegłego wieku podjęto realizację wydzielenia energii z reakcji syntezy termojądrowej w sposób niekontrolowany – wybuchowy w próbach z tzw. wzbogaconymi bombami atomowymi, w których umieszczano pewne ilości deuteru i trytu wewnątrz rdzenia z uranu-235. W tak skonstruowanej bombie energia wydzielona w wyniku syntezy była porównywalna z energią wydzielaną w wyniku rozszczepienia jąder uranu-235. Dążąc do zwiększenia mocy bomb termojądrowych stopniowo zwiększano ilość deuteru i trytu. W pierwszej amerykańskiej bombie termojądrowej jako paliwo wykorzystano kilkaset litrów ciekłego deuteru, wewnątrz którego umieszczono cylinder plutonowy wypełniony mieszkanką deuteru i trytu. Dla wytworzenia gorącej plazmy i podgrzania jej do temperatury zapłonu wykorzystano energię wydzielaną przez wybuch bomby uranowo-plutonowej, którą umieszczono na końcu zbiornika z deuterem. W ten sposób na atolu Eniwetok zrealizowano w 1952 r. wybuch pierwszej bomby wodorowej, z której uzyskano energię równoważną ok. 10 mln ton trotylu (TNT).

Olbrzymie ilości energii wydzielane w niekontrolowany sposób z reakcji syntezy jądrowej izotopów wodoru doprowadziły do powstania idei, aby tą energią zacząć wykorzystywać w sposób kontrolowany, podobnie jak to ma miejsce w reaktorach jądrowych wytwarzających energię jądrową w wyniku procesów rozszczepienia jąder atomowych.

Główną motywacją opanowania tego procesu w sposób kontrolowany było dążenie do pozyskania praktycznie niewyczerpalnego źródła energii. Zasoby paliw naturalnych wykorzystywanych na Ziemi są ograniczone i powoli ulegają wyczerpywaniu, a jednocześnie przy ich spalaniu powstają olbrzymie ilości dwutlenku węgla, którego emisja do atmosfery ziemskiej powoduje nieodwracalne zmiany klimatyczne. Przy obserwowanym wzroście zużycia energii, węgla może wystarczyć na ok. 300 lat, a ropy naftowej na ok. 70 lat. Z kolei rozwój konwencjonalnej energetyki jądrowe opartej o reakcje rozszczepienia jąder uranu i plutonu napotyka na trudności związane z długożyciowymi odpadami radioaktywnymi. Z drugiej strony wiadomo, że deuter występuje w wodzie w stężeniu 1 atom deuteru na ok. 5000 atomów wodoru. Niewielkim kosztem z 1 litra wody można wydzielić ok. 0,3 g deuteru. Całkowite zasoby deuteru na Ziemi szacuje się na ok. 10^{17} kg, co odpowiada zapasom energetycznym rzędu 10^{24} kWh. Przy utrzymaniu dzisiejszego zużycia energii na Ziemi, energii z reakcji syntezy deuteru mogłoby starczyć na 20 miliardów lat. Oto, dlaczego podjęto intensywne badania nad opanowaniem kontrolowanej syntezy termojądrowej, czyli zbudowaniu reaktora termojądrowego.

Opanowanie kontrolowanej syntezy termojądrowej (t-j) dla produkcji energii z wykorzystaniem układów z inercyjnym utrzymaniem plazmy (głównie za pomocą laserów), albo układów z magnetycznym utrzymaniem plazmy jest obecnie jednym z najważniejszych zadań światowej nauki i technologii. Realizacja tego celu ma doprowadzić do uzyskania nowego praktycznie niewyczerpalnego źródła energii bezpiecznego dla ludności i środowiska. Jak nadmienialiśmy wcześniej, produkcja takiej energii opiera się na wykorzystaniu zjawiska syntezy jąder izotopów wodoru – deuteru i trytu. Deuter znajduje się w dużych ilościach w wodzie, a tryt uzyskuje się w reaktorze t-j z reakcji neutronów generowanych w reakcji

syntezy z litem – pierwiastkiem szeroko rozpowszechnionym w skorupie ziemskiej. Reakcja syntezy termojądrowej może wydajnie zachodzić w gęstej, wysokotemperaturowej plazmie odpowiednio długo utrzymywanej przed rozlotem za pomocą pola magnetycznego, lub inercyjnie – wykorzystując ciśnienie generowane laserami albo strumieniami jonów.

W przeciwieństwie do klasycznej energetyki jądrowej energetyka termojądrowa nie łączy się z koniecznością zabezpieczenia dużej ilości długożyciowych odpadów radioaktywnych i zagrożeniem związanym z ich katastrofalnym rozprzestrzenieniem się. Takie niebezpieczeństwo dla środowiska i ludności przyczynia się do silnego oporu społecznego przeciwko rozwojowi klasycznej energetyki jądrowej. W dłuższej skali czasowej ewidentna też jest przewaga elektrowni termojądrowych nad elektrowniami wykorzystującymi spalanie kopalnych nośników energii (węgiel, ropa naftowa, gaz ziemny) zanieczyszczającymi środowisko naturalne (m.in. w wyniku emisji gazów cieplarnianych) oraz nad tzw. elektrowniami ekologicznymi i odnawialnymi wykorzystującymi mało wydajne źródła energii (energetyka słoneczna, wodna, wiatrowa, geotermalna, energia spalania materiałów biologicznych i inne). Dodatkowo należy wymienić inne zalety energetyki termojądrowej: mała zależność od lokalizacji źródeł surowców (deuteru i litu), które nie są ograniczone geograficznie, duża wydajność pojedynczych elektrowni (0,5 - 3 GW), możliwość wykorzystywania istniejących sieci przesyłowych, możliwość wykorzystania wysokie temperatury w niektórych typach elektrowni t-j do produkcji wodoru i do odsalania wody morskiej.

Realizacja syntezy t-j wersji MCF weszła w fazę budowy wielkiego tokamaka ITER, w którym sprawdzone zostaną podstawy fizyczne oraz najważniejsze rozwiązania konstrukcyjne i technologiczne w skali przed reaktorowej dla opcji MCF. Większość tych rozwiązań została przetestowana w działających, dużych tokamakach, ale zmiana skali urządzenia wpłynie istotnie na przebieg procesów fizycznych i technologicznych.

W przypadku realizacji energetyki w wersji IFE występują dodatkowe zalety, w tym: wszechstronne poznanie podstaw fizycznych towarzyszących syntezie laserowej, mała ilość trytu wprowadzana jednorazowo do komory reaktora; odseparowanie układu dostarczającego energię do plazmy (lasera) od komory, w której generowana jest energia t-j, Dopracowania wymagają konstrukcja i funkcje komory plazmowej w skali reaktorowej i technika repetytywnych laserów dużej mocy pompowanych diodami (dla zwiększenia wydajności pracy lasera). Koncepcja energetyki w wersji IFE będzie sprawdzana w najbliższych latach w uruchamianych i projektowanych wielkich układach laserowych (NIF, LMJ, FIREX II i HiPERO

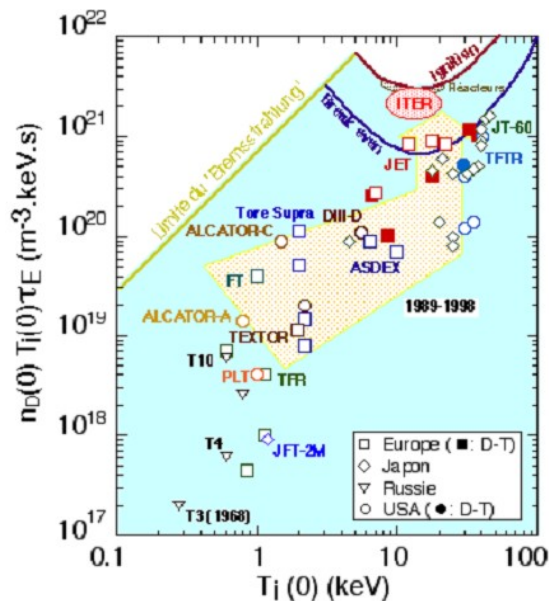
2. STAN I PERSPEKTYWY ZASTOSOWAŃ BADAŃ TERMOJĄDROWYCH W ŚWIECIE

2.1. Badania syntezy t-j w plazmie utrzymywanej polem magnetycznym (MCF).

2.1.1. Podstawy fizyczne MCF

W latach 50 ubiegłego wieku równocześnie z doskonaleniem broni termojądrowej rozpoczęto prace nad budową reaktora termojądrowego. Dla uzyskania dodatniego bilansu energetycznego w takim reaktorze paliwo termojądrowe musi być podgrzane do temperatury zapłonu (dla deuteru i trytu – 45 mln stopni), czyli będzie w postaci plazmy. Gorąca plazma w

takim reaktorze musi mieć odpowiednią gęstość (n), a czas jej otrzymania (t_L) musi być dostatecznie długi. Warunek ten opisuje tzw. Kryterium Lawsona, według którego dla uzyskania dodatniego bilansu z reakcji D-D należy zapewnić spełnienie warunku $nt_L > 10^{16}$ s/cm³, a dla reakcji D-T (deuter – tryt) - $nt_L > 10^{16}$ s/cm³. Ze względu na to, że utrzymywana plazma posiada wysoką temperaturę, to uwzględniając wpływ na dodatni bilans energetyczny zależność od temperatury plazmy, zwykle posługujemy się tzw. parametrem zapłonu reakcji termojądrowych - $Tn_e\tau_E$, gdzie T oznacza temperaturę plazmy, n_e – koncentrację elektronową plazmy, a τ_E – energetyczny czas utrzymania plazmy. Czas ten uwzględnia wpływ wszystkich strat na promieniowanie (elektromagnetyczne i korpuskularne), dyfuzję cząstek, wymianę ładunków elektrycznych, przewodnictwo cieplne, niestabilności itd. Wartość tego parametru od temperatury dla różnych reakcji syntezy przedstawiono na rys.1.



Rys.2. Najlepsze wyniki eksperymentów plazmowych na różnych układach typu tokamak.

Widać wyraźnie, że ze względu na parametr zapłonu termojądrowego kluczową sprawą dla skonstruowania reaktora będzie po pierwsze wytworzenie i grzanie gorącej plazmy, a po drugie utrzymanie i izolowanie takiej plazmy z dala od ścianek reaktora.

Najprostszym sposobem wytworzenia gorącej plazmy jest wykorzystanie silnego liniowego wyładowania elektrycznego. Kolumna zjonizowanego gazu, przez którą przepływa prąd o natężeniu setek tysięcy amperów ulega nagrzaniu, a jednocześnie plazma jest ściskana i utrzymywana z dala od ścianek przez pole magnetyczne tego prądu. Pierwsze takie układy, nazywane od kierunku przepływu prądu wzdłuż osi „Z” cylindra plazmowego „Z- Pinchami”, zostały zbudowane na początku lat 50 ubiegłego wieku, z nadzieją, że na ich podstawie powstaną pierwsze reaktory termojądrowe. W układach Z-pinch, wytwarzano stosunkowo gęsta i gorąca plazmę deuterową, z której emitowane były impulsy prędkich neutronów, świadczące o występowaniu reakcji syntezy. Jednak w układach tych straty energii związane z niestabilnościami magneto hydrodynamicznymi $m=0$, prowadziły do szybkiego rozpadu i zaniku plazmy. Jednak, metoda wytwarzania plazmy była na tyle atrakcyjna, że próbowano tą metodą wytwarzać pinch toroidalny, indukując silne prądy w próżniowej komorze w kształcie torusa, ale i w tym przypadku pojawiające się niestabilności magneto hydrodynamiczne (MHD) powodowały szybki rozpad plazmy. Aby uniknąć niestabilności MHD zaczęto stosować zewnętrzne pole magnetyczne wytwarzane przez cewki umieszczone na osi cylindra np. w pułapkach typu Mirror lub Cusp. W takich pułapkach linie sił pola nie zamykają się jednak wewnątrz plazmy i występują i występują duże straty cząstek, uciekających wzdłuż

linii sił pola ograniczającego w tzw. stożek ucieczki. Stosując iniekcję wysokoenergetycznych atomów czy omowe grzani plazmy uwięzionej w takich otwartych pułapkach magnetycznych uzyskano koncentracje plazmy rzędu $10^{13} - 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ i czasy życia $10^{-3} - 10^{-1} \text{ s}$.

Wykorzystując zewnętrzne pole magnetyczne uwalniające plazmę od niestabilności MHD opracowano pułapki magnetyczne z komora toroidalną i zamkniętymi liniami sił pola magnetycznego. Do najważniejszych konfiguracji tego typu należy zaliczyć układy typu Stellarator opracowane w USA oraz Tokamak opracowane w ZSRR. W stellaratorach oprócz cewek nawiniętych na toroidalną komorę, które wytwarzały pole toroidalne pole magnetyczne, stosowano specjalne uzwojenia spiralne, które wytwarzały pole o składowej koloidalnej. Powodowało to spiralne skrócenie linii sił pola magnetycznego (różne w różnych płaszczyznach) takie, że wypadkowe linie sił pola tworzyły powierzchnie magnetyczne poprawiające stabilizację sznura plazmowego. Natomiast w układach typu tokamak składową koloidalną pola magnetycznego wytwarzano poprzez indukowanie przepływu prądu w plazmie. W stellaratorze plazmę wytwarzano stosując wyładowanie mikrofalowe o tak dobranych częstościach, aby uzyskać elektronowy rezonans cyklotronowy, podczas gdy w tokamaku plazmę wytwarzano w wyniku indukowania w gazie wyładowania elektrycznego. W obu tych pułapkach grzanie plazmy odbywało się na albo za pomocą wstrzeliwania wiązki wysokoenergetycznych wiązek atomowych lub falami elektromagnetycznymi o częstościach jonowego rezonansu cyklotronowego.

2.1.2. Badania gorącej plazmy w tokamakach.

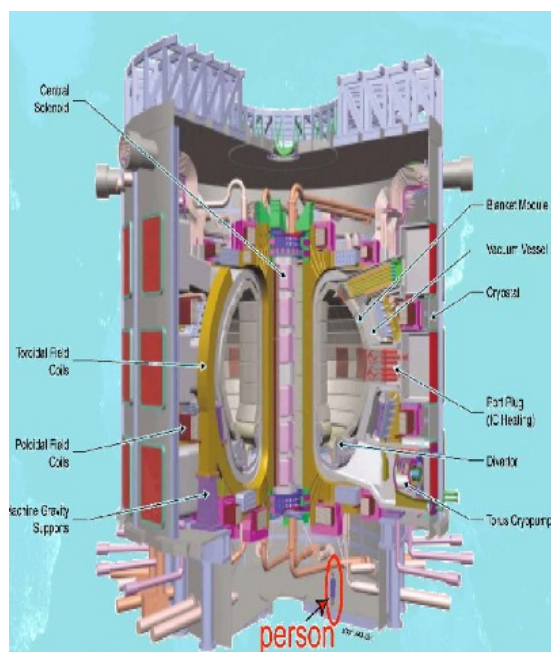
W końcu lat 60 po zmierzeniu metodą rozpraszania thomsonowskiego wysokiej temperatury plazmy w tokamakach, zaczął się szybki rozwój tych pułapek magnetycznych, w których toroidalna komora stanowi wtórne uzwojenie wielkiego transformatora. Wytwarzana, w tych urządzeniach, indukcyjnie plazma w kształcie torusa jest utrzymywana przez toroidalne pole magnetyczne pochodzące od zewnętrznych cewek nawiniętych na toroidalną kamerę, jest stabilizowana przez dodatkowe koloidalne pole magnetyczne, pochodzące od silnych impulsowych prądów płynących w plazmie. W ciągu następnego dziesięcioleci zbudowano wiele układów typu Tokamak, w tym całą rodzinę tych urządzeń (od T-1 do T-10) w Instytucie im. Kurczkowa w Moskwie [W.F.Kalinin, Termojądrowy reaktor przyszłości]. Bardzo dobre parametry plazmy otrzymanej w urządzeniu T-10 zachęciły badaczy w Princeton (USA) do przebudowy w 1969 r. największego wówczas Stellaratora – C w pierwszy amerykański Tokamak ST. Od tego czasu zaczął się wyścig w celu uzyskania coraz lepszych parametrów plazmy oraz budowa jeszcze większych urządzeń tego typu. Jednym z największych urządzeń tego typu jest zbudowany przez Wspólnotę Europejską w Culham JET (Joint European Torus) [JET – www.jet.efda.org], którego schemat przedstawiono na rys.2.



Rys. 2. Widok wnętrza komory tokamaka JET. (Po lewej widok komory w czasie wyładowania).

Do innych dużych urządzeń tego typu można zaliczyć TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor) zbudowany w Princeton (USA) oraz japoński układ JT-60. W ciągu 40 lat intensywnych eksperymentów, które prowadzono na różnych układach typu tokamak, osiągnięto znaczną poprawę parametrów zapłonu syntezy termojądrowej (rys. 1).

Dążąc do realizacji zapłonu reakcji termojądrowych, w 1991 r. w układzie JET zastosowano mieszaninę deuteru i trytu i reakcji D-D i D-T uzyskano moc 1,8 MW przez ok. 1 s. Trzy lata później w amerykańskim tokamaku TFTR, zastosowano również domieszkę trytu i uzyskano z reakcji syntezy D-T ok. 10 MW mocy w czasie 0,7 s. W 1997 roku na tokamaku JET zaczęto realizować wyładowania trwające prawie 6 s, w których uzyskano ok. 4 MW mocy. W tym samym roku stosując system zewnętrznego grzania NBI (Neutral Beam Injection) wiązką neutralnych atomów o mocy 22 MW oraz ok. 3 MW w postaci promieniowania mikrofalowego ICRH), uzyskano na JET z reakcji syntezy rekordowe moce 16 MW w wyładowaniach trwających ok. 2 s [M.Keilhacker, M.Watkins, Europhys. News, Nov/Dec. 1998, s.230]. Wyniki uzyskane na JET i TFTR zintensyfikowały prace projektowe związane z przygotowaniem założeń do projektu wielkiego układu tokamak – ITER (International Tokamak Experimental Reaktor – rys. 3).



Rys. 3. Schemat projektowanego układu ITER [ITER Newsletter IAEA, Vienna 1990].

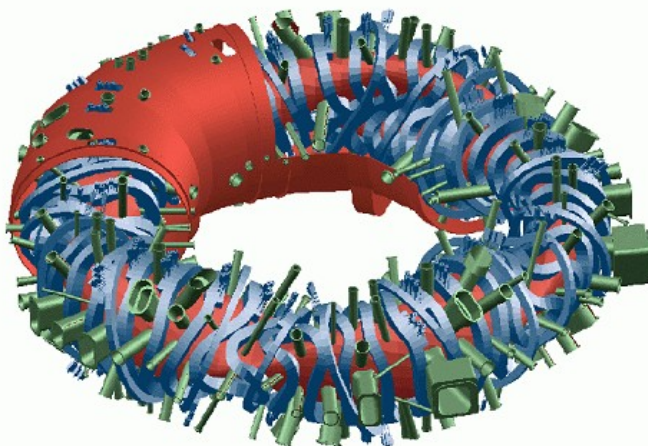
Został opracowany szczegółowy projekt tego układu [P.E. Vandenplas, Pl. Phys. Control. Fusion 40, A77(1998)] przez cztery wielkie zespoły pracujące w ramach współpracy Unii Europejskiej, Japonii, Stanów Zjednoczonych i Rosji. Koszt realizacji tej fazy projektu w latach 1994 – 97 wyniósł łącznie ok. 1,1 mld USD. Jednak pod koniec lat 90-tych, eksperymenty na dużych układach pokazały, że nie wszystkie problemy związane z fizyką plazmy w tych układach są do końca jasne. Okazało się, że w gorącej plazmie pojawiają się różnego rodzaju niestabilności np. ‘balloning modes’, oraz duże straty cząstek alfa (^4He) powstających w wyniku reakcji D-T, które powinny grzać plazmę. W 1996 roku ukazała się praca [News and Comments, Science 274,1600 (1996)] w której przedstawiono nową teorię rozwoju turbulencji w gorącej plazmie. Wykazano, że rozwój tych turbulencji dla układów takich jak ITER może spowodować znaczne straty energii nie doprowadzając do zapłonu. W rezultacie władze USA wycofały się z finansowania projektu ITER, którego koszt oceniono na 10 mld dolarów.

Niemniej jednak, w 2000 roku Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej w Wiedniu (IAEA) ogłosiła oficjalne zakończenie 9 letnich prac nad projektem technicznym ITER-a. Układ w myśl projektu powinien wytwarzać moc 500 MW w czasie setek sekund. Po zakończeniu projektu zaczęto rozważać lokalizację tej wielomiliardowej inwestycji. W lipcu 2001 r. władze Kanady zaoferowały lokalizację na jeziorze Ontario, jednocześnie Japonia złożyła propozycję lokalizacji u siebie. W końcu przeważyła oferta Unii Europejskiej, która zgodziła się w 50% sfinansować ten projekt w zamian za jego lokalizację w Cadrache we Francji, co zakończyło spory i w 2006 roku podpisano porozumienie o lokalizacji projektu ITER w Europie.

Badania prowadzone w wielu krajach na różnego typu tokamakach pozwoliły na opracowanie koncepcji zasadniczych elementów, przyszłego reaktora termojądrowego, w które będzie wyposażony także ITER. I tak jednym z istotnych elementów muszą być osłony wewnętrzne i zewnętrzne, które umożliwią wykorzystanie energii prędkich neutronów z reakcji D-T (14 MeV/neutron) do produkcji ciepła oraz odtwarzania trytu z litu, znajdującego się w blankiecie. Odzyskany tryt można stosować ponownie jako paliwo w mieszance z deuterem. Ciepło poprzez wymienniki może dostarczać energię do turbin i generatorów jak w klasycznej elektrowni. Istotną różnicą w reaktorze termojądrowym będą jednak obciążenia radiacyjne i cieplne materiałów, co będzie stanowić wielkie wyzwanie dla przyszłych konstruktorów reaktora. Co prawda część proponowanych rozwiązań technicznych i konstrukcyjnych została zastosowana z powodzeniem w dużych układach eksperymentalnych (TFTR, JET) i sprawdzona w warunkach przewidywanych w przyszłych reaktorach. Jednakże, najważniejsze zagadnienia związane z materiałami dla ITERA czy przyszłego reaktora DEMO, będą intensywnie badane w na pilotażowych układach symulujących obciążenia cieplne w wyniku oddziaływań plazma-ścianka, czy też obciążenia radiacyjne materiałów np. projekt IFMIF.

2.1.3. Badania gorącej plazmy w Stellaratorach.

W Japonii i Niemczech od kilkunastu lat są kontynuowane badania nad drugim typem toroidalnych pułapek magnetycznych tzw. stellaratorami. W Garching (Niemcy) przeprowadzono wiele eksperymentów na stellaratorach Wendelstein (od W1-A do W7-AS [F.Wagner, J.Tech.Phys. 41, Spec. Issue (2000), p.7]. W stellaratorze W7-AS uzyskano rekordowe wartości pola ograniczającego oraz udało się wytworzyć gorącą plazmę bez indukowania prądu wewnątrz plazmy jako wtórnego uzwojenia transformatora (tak jak w tokamakach).



Rys. 4. Komora W-7X z zaznaczonymi cewkami.

W związku z tym niestabilności charakterystyczne dla układów plazmy z prądem charakterystyczne dla tokamaków przestały być groźne. Udało się, stosując różne metody wytwarzania plazmy i grzania jej za pomocą promieniowania elektromagnetycznego uzyskać plazmę o parametrach zgodnych z przewidywaniami teorii. Na tej podstawie opracowano projekt stellaratora następnej generacji tzw. Wendelstein 7 – X (W-7X), który na podstawie decyzji rządu Niemiec jest obecnie budowany w Greifswaldzie niedaleko Szczecina rys.4.

Uruchomienie W7-X pozwoli na sprawdzenie praw skalowania stellaratorów i pozwoli, w wypadku pozytywnego rezultatu, na zrobienie następnego kroku na drodze do budowy reaktora w oparciu o konfigurację zamkniętej pułapki magnetycznej [E.I.Moses Current Trends In IFR Proc. 4th Symp. Washington 2001].

2.1.4. Badania technologiczne dotyczące oddziaływania plazma-ścianka w układach MCF.

Układy termojądrowe są złożonymi systemami technicznymi, których prawidłowe działanie zależy nie tylko od przebiegu skomplikowanych procesów fizycznych, ale także od odpowiednich rozwiązań konstrukcyjnych i od wykorzystania prawidłowych procesów technologicznych. Bardzo ważną rolę odgrywają rozwiązania konstrukcyjne i procesy technologiczne związane z oddziaływaniem plazmy, szybkich cząstek i promieniowania z wewnętrzną ścianą tokamaka, skrótowo nazywanymi „oddziaływaniami plazma-ścianka” (Plazma- Wall Interaction – PWI).

Badania i propozycje rozwiązań technologicznych dotyczące oddziaływań „plazma-ścianka” w układach tokamak prowadzone są na działających układach tokamak i w wielu laboratoriach przy użyciu urządzeń symulujących warunki występujących w tych układach. Do najważniejszych zagadnień z obszaru PWI należą usuwanie trytu gromadzącego się na elementach wewnętrznych ścian w komorze tokamaka oraz charakteryzowanie i usuwanie pyłu powstającego w tej komorze w czasie wyładowań plazmowych.

Badania przeprowadzone w tokamakach i w laboratoriach dotyczące deponowania deuteru i trytu wewnątrz komory tokamaka wykazały, że adsorpcja tych izotopów jest duża. Deuter i tryt są adsorbowane w warstwie kodepozytu składającej się z materiału ścianek odparowywanego z różnych miejsc na powierzchni wewnętrznej komory tokamaka. Szczególnie w przypadku stosowania płytek grafitowych jako pokrycia wewnętrznej ściany tokamaka gromadzenie się trytu (deuteru) w kodepozycie jest szczególnie efektywne. Badane są różne metody usuwania kodepozytu z zaadsorbowanym trytem zarówno w eksperymentach prowadzonych we wnętrzu komory tokamaka jak i w laboratoriach technologicznych. Do najważniejszych technik usuwania kodepozytu z elementów wewnętrznych w komorze tokamaka należy zaliczyć: odparowanie wiązką laserową i lampami błyskowe albo wyładowaniami w gazie – bez naruszania powierzchni ścianki, utlenianie warstwy kodepozytu, zmywanie strumieniem wody. Istnieje potrzeba ostatecznego wypracowanie efektywnej metody usuwania trytu (deuteru) dla potrzeb budowanego już wielkiego tokamaka ITER.

Usuwanie trytu i deuteru wraz z warstwą kodepozytu z użyciem wiązki laserowej realizowane są poprzez odparowanie (ablację) tej warstwy promieniowaniem laserowym o niskiej fluencji. Energia, intensywność, czas trwania impulsu laserowego, długość fali promieniowania laserowego oraz własności naświetlanej próbki są czynnikami wpływającymi na efektywność tego procesu.

Zastosowanie płytek węglowych do pokrycia ścian w tokamaku powoduje powstawanie pyłu na skutek oddziaływań plazma-ścianka. Pył ten osadza się w różnych miejscach w komorze tokamaka w postaci kodepozytu wpływając na własności plazmy brzegowej. Pył ten może zanieczyszczać plazmę centralną, szczególnie w wyniku niestabilności w plazmie

brzegowej (tzw. ELM's) i efektu zrywania sznura plazmowego. W tokamakach z ścianami pokrytymi berylem, które będą stosowane w najnowszych tokamakach, pył składa się z drobin berylu i jego związków. Beryl jest materiałem silnie toksycznym i w postaci pyłu może występować w komorze tokamaka w ograniczonych ilościach, szczególnie w dużych układach, gdzie pył jest produkowane w większych ilościach. Dla zbierania i badania pyłu w komorze tokamaka są najczęściej stosowane są następujące metody: kolektory (diafragmy) elektrostatyczne, kamery CCD o dużej rozdzielczości, analizy materiałowe i chemiczne drobin pyłu zebranego we wnętrzu komory tokamaka.

Ponieważ pył może być niebezpieczny radiologicznie (tryt) i chemicznie (beryl) bardzo ważne jest poznanie mechanizmów generacji pyłu w tokamakach, badanie jego właściwości oraz opracowanie efektywnych i bezpiecznych metod jego usuwanie. Dla bezpieczeństwa ludności powinny być dokładnie określone dopuszczalne ilości pyłu w komorze tokamaka i odpowiednie metody usuwania oraz neutralizowania pyłu tokamakowego.

Inną ważną problematyką technologiczną wpływająca w sposób decydujący na sprawność działania tokamaka jest obszar obejmujący **badania i zastosowania odpowiednich materiałów** do budowy różnych elementów tego układu. Szczególnie krytyczne jest dobieranie odpowiednich materiałów dla wewnętrznej ściany komory tokamaka i urządzeń tam się znajdujących, w tym układu tzw. divertora wykorzystywanego głównie do zbierania i odprowadzania zanieczyszczonych gazów i pyłu. Nie ma idealnego materiału dla wewnętrznej powierzchni komory tokamaka spełniającego jednocześnie najważniejsze wymagane parametry, w szczególności niska liczba atomowa, wysoka temperatura topnienia, mała podatność na odparowanie i niska toksyczność. Materiały te są sprawdzane w istniejących tokamakach i w specjalistycznych laboratoriach materiałowych.

W ramach europejskiej Wspólnoty EURATOM prace naukowe i badawczo-rozwojowe realizowane w różnych laboratoriach w Europie, są koordynowane przez specjalny organ **European Task Force for Plasma Wall Interaction**. Prace te będą zintensyfikowane po uruchomieniu projektowanego obecnie dużego układu Magnum, w którym będą symulowane procesy PWI. Rozpatrywane są możliwości budowy innych urządzeń dla takich badań.

2.2. Badania syntezy termojądrowej w plazmie utrzymywanej inercyjnie (IFE)

2.2.1. Laserowa synteza termojądrowa z centralnym zapłonem skompresowanego paliwa DT

W konwencjonalnej wersji fuzji inercyjnej, zaproponowanej na początku lat 70-ych [Nuckolls et al., Nature 239(1972)172], sferyczna tarcza zawierająca paliwo DT oświetlana jest symetrycznie wieloma wiązkami lasera nanosekundowego (wariant „direct-drive”) lub promieniowaniem X generowanym przez ten laser (wariant „indirect-drive”), skutkiem czego jest wytworzenie plazmy na powierzchni sferycznej mikrotarczy i jej gwałtowna ekspansja na zewnątrz tarczy [Lindl, PoP 2(1995)3933]. Pęd ekspandującej plazmy jest równoważony przez pęd wewnętrznej części tarczy, zawierającej mieszaninę deuteru i trytu (paliwo DT), co powoduje implozję tarczy do wewnątrz i kompresję (ściskanie) paliwa. Zmniejszaniu objętości implodującej tarczy towarzyszy wzrost temperatury w jej wnętrzu (przemiana ma z grubsza charakter izobaryczny) oraz wzrost gęstości paliwa DT. Temperatura wzrasta do ~ 10 keV), co umożliwia zachodzenie reakcji syntezy deuteru i trytu. Żeby jednak energia wydzielona w reakcjach syntezy, była większa od energii dostarczanej przez laser gęstość ściśniętego paliwa powinna być ponad 1000 razy większa od gęstości stałego DT, a jego masa winna przekraczać pewną wartość krytyczną \sim mg. Uzyskanie takich warunków wymaga lasera nanosekundowego (~ 10 ns) o bardzo dużej energii ≥ 1 MJ, wielkiej symetrii oświetlenia

tarczy oraz spełnienia wielu innych, trudnych technicznie warunków [Atzeni & Meyer-ter-Vehn, Phys. of Inertial Fusion, Clarendon Press, (2004)].

Obecnie uruchamiany jest **układ National Ignition Facility (NIF)** w Livermore (w Stanach Zjedn.) o energii lasera $\sim 2\text{MJ}$ [Moses et al., PoP 6(2009)041006]. W Bordeaux we Francji budowany jest **układ LMJ** także o energii lasera $\sim 2\text{MJ}$, którego uruchomienie projektowane jest na lata 2012 – 2013. Przewiduje się, że w ciągu najbliższych 2 lat na urządzeniu NIF zostanie zademonstrowana fuzja w wariancie „indirect-drive” ze wzmocnieniem energii ~ 10 . Gotowy budynek lasera NIF widoczny jest na rys. 5.



Rys.5. Budynek wielkiego systemu laserowego NIF w Livermore (USA) uruchomionego w 2009r, przeznaczonego do badań syntezy laserowej..

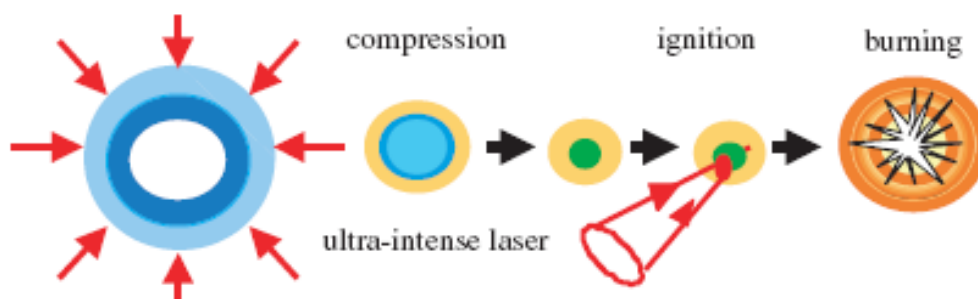
Zarówno NIF jak i LMJ są urządzeniami „jednostrzałowymi” (o bardzo niskiej częstotliwości repetycji). Będą w dużym stopniu wykorzystywane do celów militarnych, co ograniczy dostęp cywilnych środowisk naukowych do tych urządzeń.

2.2.2. „Szybki zapłon” wstępnie skompresowanej tarczy termojądrowej

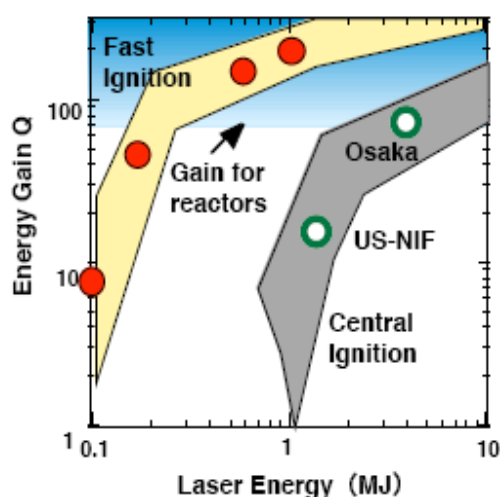
W połowie lat 90-tych ub. wieku w Stanach Zjednoczonych zaproponowano nową wersję fuzji inercyjnej a mianowicie **fuzję z tzw. szybkim zapłonem** (ang. fast ignition fusion – FIF) [Tabak et al., PoP, 1(1994)1626]. W wersji tej zapłon paliwa DT – wstępnie skompresowanego laserem wielowiązkowym do gęstości „tylko” ~ 100 gęstości stałego DT – następuje w wyniku gwałtownego podgrzania (w czasie $\sim 10 - 30\text{ps}$) paliwa DT przez bardzo intensywny ($\sim 10^{20}\text{W/cm}^2$) **strumień cząstek** (elektronów, jonów) [Tabak et al., PoP, 1(1994)1626; Key, PoP, 14(2007)055502; Badziak et al., PPCF, 49(2007)B651; Fernandez et al., NF 49(209)065004] lub **uderzenie mikropocisku** (o masie: $10^{-5} - 10^{-4}\text{g}$) przyspieszonego do wielkiej prędkości $\geq 1000\text{ km/s}$ [Murakami et al., NF46(2006)99].

Według obecnej wiedzy, uzyskanie wysokiego wzmocnienia energii (50 – 100 razy) w wariancie FIF jest możliwe przy całkowitej energii lasera komprimującego („drivera”) 5 – 10 razy mniejszej niż w wariancie tradycyjnym (z samoczynnym zapłonem centralnym) oraz przy znacznym obniżeniu wymagań technicznych związanych z kompresją paliwa termojądrowego. Oznacza to możliwość kilkakrotnego obniżenia kosztów urządzenia fuzyjnego (koszt NIF to ~ 5 miliardów USD), a także znaczne ułatwienia w konstrukcji lasera repetytywnego (częstość 5 – 10 Hz), co jest niezbędne dla produkcji energii w reaktorze termojądrowym dla celów komercyjnych. Rozpatrywana jest także możliwość wykorzystania do FIF **akceleratora ciężkich jonów lub układu typu Z-pinch** do wstępnej kompresji paliwa DT. Schematycznie metodę szybkiego zapłonu pokazano na rys. 7.

Dla osiągnięcia zapłonu paliwa DT za pomocą szybkiego zapłonu (FIF) wymagane jest osiągnięcie odpowiedniej gęstości tego paliwa przy minimalnej energii lasera komprymującego i ekstremalnych parametrów strumienia cząstek lub mikropocisku przyspieszanych laserem PW-owym („ignitor”) inicjujących zapłon t-j.



Rys. 6. Metoda szybkiego zapłonu paliwa DT wstępnie skompresowanego laserem wielowiązkowym. Impuls energii inicjującej „szybki zapłon” dostarczany jest dodatkowym paserem wielkiej mocy.



Rys. 7. Zależność wzmocnienia energetycznego w wyniku syntezy laserowej w zależności od energii lasera dla wariantu z szybkim zapłonem („Fast ignitron”) i wariantu z zapłonem Centralnym („Central Ignitron”).

Dla generacji **wiązek elektronów lub jonów** (przede wszystkim protonów) przewiduje się wykorzystanie **lasera pikosekundowego** o mocy kilku – kilkudziesięciu PW ($1\text{PW}=10^{15}\text{W}$) [Key, PoP, 14(2007)055502; Badziak et al., PPCF, 49(2007)B651; Fernandez et al., NF 49(2009)065004]. W przypadku szybkiego zapłonu zderzeniowego dla akceleracji mikropocisku (faktycznie – bloku gęstej plazmy DT lub DD) możliwe jest zastosowanie lasera o mniejszej mocy (0.1 – 0.5 PW), generującego impuls **nano- lub subnanosekundowy** [Murakami et al., NF 46(2006)99] (laser taki jest urządzeniem znacznie prostszym i mniej kosztownym niż PW-owy laser pikosekundowy).

Rozważanych jest kilka opcji szybkiego zapłonu, a w szczególności:

1/ **Zapłon elektronowy** (elektron fast ignition – EFI), w którym zapłon skompresowanego paliwa DT jest inicjowany bardzo intensywną (natężenie $\sim 10^{20}\text{W/cm}^2$,

energia całkowita: ~20kJ) wiązką relatywistycznych elektronów o energii 1–2 MeV wytwarzanych laserem wielkiej mocy ($\geq 10\text{PW}$) o czasie trwania impulsu ~10ps [Tabak et al., PoP, 1(1994)1626; Key, PoP, 14(2007)055502; Badziak et al., PPCF, 49(2007)B651. Zaletą EFI jest wysoka sprawność energetyczna generacji elektronów (~30%), są jednak trudności związane z transportem i przekazem energii wiązki elektronów do paliwa DT;

2/ Zapłon protonowy (jonowy) [proton (ion) fast ignition – PFI lub IFI], w którym zapłon paliwa inicjowany jest w czasie 10–20 ps przez bardzo intensywną (10^{20}W/cm^2) wiązkę protonów o energiach 3–10 MeV (całkowita energia wiązki 10–20 kJ) lub innych jonów (np. jonów C o energiach 300–400 MeV) generowanych laserem o mocy 10–100 PW w impulsie piko- lub subpikosekundowym z tarczy stałej umieszczonej w bezpośredniej bliskości tarczy fuzyjnej (DT) [Key, PoP, 14(2007)055502; Badziak et al., PPCF, 49(2007)B651; Fernandez et al., NF 49(2009)065004]. zaletą tego wariantu jest wysoka efektywność deponowania energii wiązki protonów (jonów) w paliwie DT, natomiast problemem jest uzyskanie odpowiednio dużej ($\geq 15\%$) sprawności wytwarzania wiązki protonów (jonów) oraz wymaganej intensywności i widma energetycznego wiązki.

3/ Zapłon zderzeniowy (impact ignition – II), przy którym gwałtowne podgrzanie skompresowanego paliwa jest wynikiem uderzenia mikropocisku o masie 10^{-5} – 10^{-4}g rozpędzonego przy pomocy subpetawatowego lasera nano/subnanosekundowego do prędkości $\geq 1000\text{ km/s}$ [Murakami et al., NF46(2006)99]; ważną zaletą zapłonu zderzeniowego jest możliwość zastosowania do przyspieszenia mikropocisku lasera ns/subns, tańszego niż multipetawatowego lasera ps. Główną trudność stanowi tu przyspieszenie mikropocisku o odpowiednio dużej masie do wymaganej, bardzo dużej prędkości.

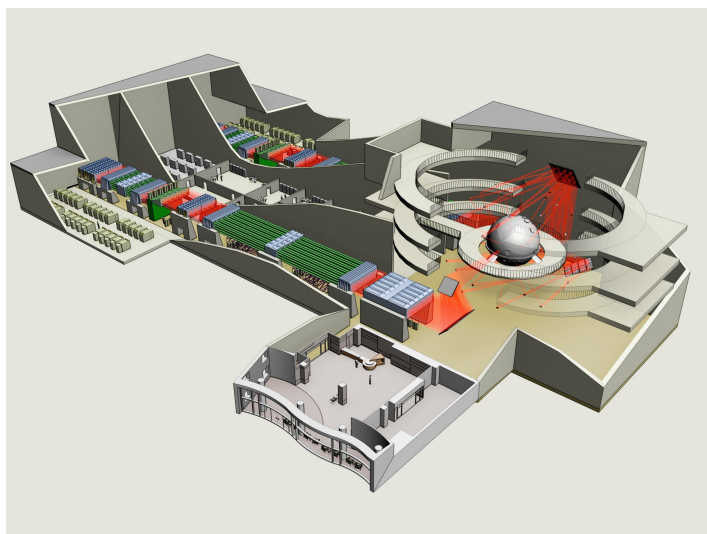
4/ Zapłon falą uderzeniową (shock ignition – SI); w tym przypadku „zapalnikiem” jest silna, sferyczna fala uderzeniowa wygenerowana w tarczy DT w końcowym stadium jej kompresji przez najbardziej intensywną, końcową część odpowiednio ukształtowanego impulsu laserowego komprymującego paliwo [Betti et al., PRL, 98(2007)]. Atutem tego wariantu jest stosunkowo prosta konstrukcja tarczy DT oraz możliwość zastosowania jednego lasera zarówno do sferycznej kompresji jak i sferycznego szybkiego zapłonu paliwa DT. Badania w tym zakresie są jednak na początkowym etapie;

Możliwość **realizacji FIF została zademonstrowana w małej skali** (przy energii laserów ~ kJ) na początku obecnej dekady przez zespół japońsko-brytyjski w eksperymencie przeprowadzonym w LLE w Osace (Japonia) [Kodama et al., Nature 418(2002)933], w którym wykazano 1000-krotny wzrost liczby neutronów generowanych w reakcji fuzji D+D (w porównaniu z wariantem bez lasera szybkiego zapłonu). Bardzo obiecujące wyniki tego eksperymentu stały się stymulatorem gwałtownego rozwoju tego kierunku badań fuzji inercyjnej m.in. w St. Zjed., Japonii i Europie. Ostatnio zademonstrowano również fizyczną możliwość realizacji zapłonu zderzeniowego [Azechi et al., PRL, 102(2009)235002]. W eksperymencie wykonanym w Japonii uzyskano 100-krotny wzrost liczby wyprodukowanych neutronów syntezy.

2.2.3. Projekt HiPER - laserowa synteza termojądrowa z szybkim zapłonem

Gwałtowny rozwój badań fuzji inercyjnej z szybkim zapłonem – zapoczątkowany w połowie poprzedniej i zintensyfikowany na początku obecnej dekady – zaowocował utworzeniem w Europie międzynarodowego projektu dotyczącego fuzji inercyjnej o nazwie HiPER (od High Power Laser Energy Research Facility) [Dunne, Nature Phys.2(2006)2]. Projekt ten w roku 2006 został umieszczony na tzw. europejskiej mapie drogowej dot. infrastruktury badawczej, a obecnie realizowana jest trzyletnia faza przygotowawcza tego

projektu, w której uczestniczy ponad 30 laboratoriów naukowych z 9 krajów UE, a także instytucje z Rosji (2), St. Zjed. (2), Kanady (1), Chin (3), Japonii (1) i Korei Płd. (1). Polskę w tym projekcie reprezentuje IFPiLM. Głównym celem projektu HiPER jest zbudowanie laserowej infrastruktury badawczej dla badań fuzji inercyjnej w wersji szybkiego zapłonu (FIF) oraz zademonstrowanie wysokiej efektywności FIF, zapewniającej uzyskanie wzmocnienia energii $G \approx 50 - 100$. Jako jedyny w świecie, projekt ten zakłada wykorzystanie do tego celu laserów pracujących z dużą częstością repetycji (5 – 10 Hz), wymagana dla reaktora termojądrowego. Badania naukowe realizowane i planowane w ramach projektu HiPER są skoncentrowane na fuzji laserowej, ale obejmują również badania podstawowe z innych dziedzin, a także prace związane z rozwojem technologii i technik niezbędnych do zbudowania urządzenia HiPER, przede wszystkim technik laserowych. Koncepcja architektoniczna infrastruktury HiPER jest widoczna na rys. 8.



Rys. 8 . projekt koncepcyjny infrastruktury laserowej HiPER.

Projekt HiPER obejmuje badania rozmaitych, fizycznych i technicznych, aspektów **różnych wariantów szybkiego zapłonu**, (elektronowego, protonowego, jonowego, zderzeniowego, falą uderzeniową) w tym całkowicie nowych zagadnień związanych np. z relatywistycznym oddziaływaniem lasera z materią (przy intensywnościach: $10^{19} - 10^{22} \text{ W/cm}^2$), wytwarzaniem i transportem wiązek elektronów o gęstościach prądu ($\sim 10^{14} \text{ A/cm}^2$), generacją pikosekundowych wiązek jonów o natężeniach większych o kilka rzędów wielkości od natężenia wiązek wytwarzanych w największych akceleratorach, czy też z akceleracją cząstek makroskopowych do nieosiągalnych do tej pory hiperprędkości. Badania fuzyjne obejmują także szereg zagadnień związanych z technologią wytwarzania i transportu tarcz (w tym kriogenicznych tarcz DT) i technologią reaktorową (m.in. badania symulacyjne skutków mikroeksplozji termojądrowej i jej wpływu na elementy komory plazmowej), jak również opracowanie metod i urządzeń diagnostycznych niezbędnych w tych badaniach.

Realizacja projektu została podzielona na trzy fazy: fazę przygotowawczą (okres 2008 – 2011), fazę projektowo-techniczną (2011 – 2013) oraz fazę konstrukcji (2014 – 2020). Fazy te są skorelowane z kluczowymi wydarzeniami w badaniach fuzji laserowej, a w szczególności z uruchomieniem układu NIF w St. Zjedn. oraz multikilodżulowego lasera pikosekundowego PETAL we Francji (w latach 2011 – 2012). Dzięki wynikom uzyskanym za pomocą tych urządzeń możliwa będzie racjonalna korekta kierunków rozwoju projektu.

Celem fazy przygotowawczej jest m.in.: opracowanie – w oparciu o badania eksperymentalne i symulacje numeryczne – podstaw fizycznych fuzji z szybkim zapłonem (FIF) dla różnych opcji szybkiego zapłonu (pkt 2.2.2.) i sprecyzowanie warunków

technicznych ich realizacji, opracowanie projektu koncepcyjnego urządzenia HiPER oraz zaproponowanie długofalowego programu badań fuzyjnych i podstawowych na tym urządzeniu. Prace objęte fazą przygotowawczą zostały podzielone na 15 pakietów roboczych (Workpackage – WP) z czego 7 dotyczy szeroko rozumianych prac organizacyjnych, zaś pozostałe 8 to pakiety naukowo-techniczne.

2.2.4. Modelowanie fuzyji inercyjnej

W fuzyji inercyjnej można wyróżnić trzy sprzężone ze sobą etapy: kompresję, zapłon i spalanie paliwa DT. Modelowanie fuzyji inercyjnej wymaga więc uwzględnienia wielu różnych procesów, a w szczególności: oddziaływania promieniowania z plazmą, akceleracji i kompresji plazmy, różnych rodzajów transportu energii, jądrowych reakcji syntezy, transportu produktów syntezy w plazmie i innych. Dodatkowo, w wariantcie szybkiego zapłonu, niezbędne jest modelowanie procesów akceleracji, transportu i deponowania energii w paliwie DT strumienia cząstek (elektronów, jonów) lub mikropocisku (w przypadku zapłonu zderzeniowego).

Podstawowym narzędziem numerycznego modelowania kompresji i spalania paliwa są kody płynowe (hydrodynamiczne) uzupełnione kodami Monte Carlo (najczęściej 2D), zaś dla modelowania akceleracji i transportu strumienia cząstek zwykle stosuje się relatywistyczne kody typu „particle-in-cell” (PIC) [Birdsall et al., Plasma Physics via Computer Simulations, IoP, Bristol 1991], a niekiedy również kody hybrydowe (cząstkowo-płynowe). Przykładem zaawansowanego kodu płynowego 2D, stosowanego między innymi w projekcie HiPER jest kod DUED [Atzeni, Comput. Phys. Comm. 43(1986)107; Atzeni et al., PoP 15(2008)056311].

2.2.4. Projekt HiPER - planowane badania nie-fuzyjne z użyciem infrastruktury laserowej

Przewiduje się, że urządzenie HiPER będzie wyposażone w dwa sprzężone ze sobą lasery o bardzo dużej energii i mocy, a mianowicie laser nanosekundowy o energii ~ 200 kJ oraz laser pikosekundowy o energii ~100 kJ i mocy kilku – kilkudziesięciu PW lub, zamiennie, laser femtosekundowy o mocy > 100 PW (omówione dalej). Byłaby to więc infrastruktura badawcza unikatowa w skali światowej, umożliwiająca prowadzenie badań podstawowych w różnych dziedzinach, w tym badań materii w stanach ekstremalnych, nieosiągalnych do tej pory w warunkach ziemskich. **Obecnie rozważane są następujące kierunki tych badań:**

- astrofizyka laboratoryjna (laboratoryjne symulacje różnych zjawisk astrofizycznych),
- fizyka tzw. ciepłej gęstej materii (m.in. we wnętrzach Ziemi i innych planet),
- własności materiałów w warunkach bardzo wysokich ciśnień (10 – 1000 Mbar),
- fizyka atomowa przy b. wysokich ciśnieniach i temperaturach,
- ultraintensywne oddziaływanie lasera z plazmą i plazma relatywistyczna,
- wytwarzanie i oddziaływanie bardzo intensywnych wiązek elektronów i jonów (m.in. dla potrzeb fizyki jądrowej, fizyki cząstek oraz medycyny nuklearnej),
- zjawiska fizyczne w supersilnych polach.

2.2.5. Projekt HiPER – technika laserowa

Projekt HiPER jest szczególnym, niezwykłym wyzwaniem dla techniki laserowej. Przewidywane jest zbudowanie trzech laserów wielkiej mocy: wielowiązkowego lasera nanosekundowego, lasera pikosekundowego oraz lasera femtosekundowego. Parametry tych laserów, wymagane dla realizacji celów projektu, są obecnie przedmiotem szczegółowych analiz i symulacji komputerowych. Poniżej przedstawiono przybliżone wartości niektórych z tych parametrów i odzwierciedla obecny przewidywania wiedzy realizatorów projektu.

Wielowiązkowy laser nanosekundowy (dla kompresji tarczy DT): energia- 200kJ; długość fali podstawowa $\sim 1\mu\text{m}$ (1ω); robocza - 2ω lub 3ω ; czas trwania impulsu - 5 ns; natężenie światła w ognisku - $10^{14} - 10^{15} \text{ W/cm}^2$; kształt impulsu.- profilowany; liczba wiązek - ≥ 40 . Laser byłby zbudowany wg tradycyjnej architektury (zastosowanej np. w NIF), tzn. w schemacie: układ generacyjny (front-end) – wzmacniacz główny – układ transportu i ogniskowania wiązki (zawierający m.in. układ konwersji częstotliwości).

Laser pikosekundowy (dla zapłonu paliwa wiązką elektronów lub jonów): energia - 80 – 100kJ; długość fali $\sim 1\mu\text{m}$ (1ω) lub 2ω ; czas trwania impulsu $\sim 10\text{ps}$; kontrast impulsu $>10^7$; natężenie światła w ognisku - $10^{20} - 10^{21} \text{ W/cm}^2$; rozmiar ogniska wiązki - $40\mu\text{m}$. Dla wzmocnienia i kompresji impulsu do zakresu pikosekundowego zostanie zastosowana technika CPA (chirped pulse amplification).

Laser femtosekundowy (tylko dla badań podstawowych): moc- $\geq 150\text{PW}$; długość fali $\sim 1\mu\text{m}$; czas trwania impulsu - 30fs; natężenie światła w ognisku - $5 \times 10^{24} \text{ W/cm}^2$. W laserze zostanie zastosowana technika OPCPA (optical parametric chirped pulse amplification), zgodnie z którą impuls z „chirpem” będzie wzmacniany we wzmacniaczu parametrycznym (kryształ nieliniowy) pompowanym wiązką lasera nanosekundowego, a następnie komprimowany do zakresu femtosekundowego za pomocą siatek dyfrakcyjnych.

W wersji docelowej w/w lasery powinny pracować z repetycją 5–10 Hz w cyklach trwających kilka sekund, co wymaga zastosowania diod laserowych do pompowania ośrodka czynnego. W chwili obecnej prace w tym zakresie są na wstępnym etapie.

2.2.6. Inne projekty międzynarodowe dotyczące IFE (CRP IAEA, IFE-WG EURATOM, LASERLAB-Europe, COST).

Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej koordynuje ogólnoswiatowe programy badawcze dotyczące między innymi badań różnych wariantów zastosowania energii rozszczepienia jąder i syntezy termojądrowej dla produkcji energii elektrycznej. Obecnie realizowany jest program: „The IAEA Co-ordinated Research Project (CRP) No. F1.30.11 entitled: CRP: Pathways to Energy from Inertial Fusion – An integrated approach”.

Europejska Wspólnota EURATOM koncentruje się na opracowaniu układów termojądrowych z utrzymaniem magnetycznym (MCF - tokamaki i stellaratory) dla produkcji energii elektrycznej. Obejmuje też w małym zakresie aktywność krajowych Asocjacji w tej Wspólnocie dotyczącą proc związanych z opracowaniem syntezy z inercyjnym utrzymaniem plazmy (IFE – „keep-in-touch” activity). Prace te koordynowane są w ramach Wspólnoty EURATOM przez specjalną Grupę Roboczą (IFE – Working Group), która sporządza roczne plany i raporty dla centralnego organu Wspólnoty EURATOM (CCE-FU).

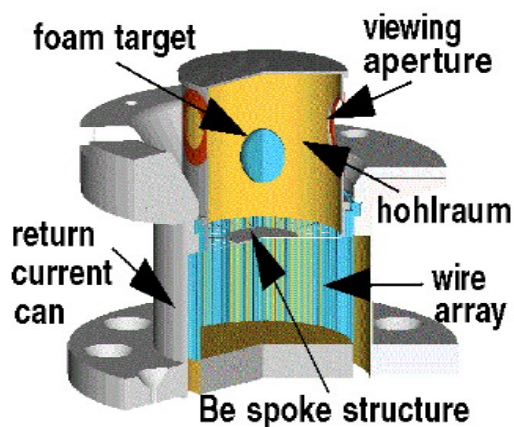
Program kooperacyjny „The Integrated Initiative of European Laser Infrastructures skrótowo nazywany - LASERLAB-Europe” funkcjonuje w ramach 7-ego Programu Ramowego Unii Europejskiej Badań i Rozwoju. Program ten obejmuje kilkanaście

europejskich laboratoriów dysponujących największymi laserami stosowanymi do różnych badań oddziaływań laser-materia. Część projektów realizowanych w tych laboratoriach z dofinansowaniem przez UE dotyczy różnych aspektów syntezy laserowej. LASERLAB-Europe jest Konsorcjum skupiającym 17 europejskich laboratoriów laserowych. Celem LASERLAB-Europe jest udostępnianie i dofinansowanie wspólnych badań laserowo-plazmowych w najważniejszych europejskich centrach laserowych.

Programy typu COST uruchamiane są w ramach Europejskiej Fundacji Naukowej (ESF - European Science Foundation) i dotyczą współpracy naukowej w różnych dziedzinach. W latach 2004-2008 realizowany był projekt COST Action P14: Laser-matter Interactions with ultra-short pulses, high-frequency pulses and ultra-intense pulses; From Attophysics to Petawatt Physics dotyczący między innymi badań zjawisk ważnych dla syntezy laserowej z szybkim zapłonem. Kontynuacją tego projektu jest projekt *ESF SILMI: Super-intense laser-matter interactions*.

2.3. Alternatywne metody utrzymania i badania plazmy t-j – PF i Z-pinch.

Gorącą plazmę o koncentracjach jonów w centymetrze sześciennym o sześć rzędów wielkości większą niż w pułapkach o konfiguracjach typu tokamak czy stellarator można wytworzyć wykorzystując impulsowe, bardzo silne wyładowania elektryczne między osiowymi lub cylindrycznymi elektrodami. Układy Z-pinch zapoczątkowały badania nad kontrolowaną syntezą termojądrową, jednakże niestabilności, a szczególnie niestabilność $m=0$ powodowały bardzo, krótki czas życia plazmy, co nie pozwalało myśleć w tamtych czasach o tych układach jako o przyszłych reaktorach termojądrowych. Jednakże rozwój nowoczesnej techniki impulsów wielkiej mocy, umożliwiający wytwarzanie impulsów prądowych o natężeniu wielu megaamperów, doprowadził do renesansu tych układów tym razem jako układów inercyjnego utrzymywania gorącej plazmy [G.Yonas, Scientific American August 1998, s. 41, C. Deeney, Proc. ICOPS 1999, Monterey]. I tak, w układzie SATURN przeprowadzono eksperymenty dokonując implozji tarcz wykonanych z wielu (do kilkuset) cienkich włókien metalowych o średnicach rzędu mikrometrów, uzyskując emisję bardzo intensywnych impulsów rentgenowskich. Eksperymenty, które wykonano z cylindrami o średnicy 12,5 mm złożonymi z 70 drucików wolframowych o średnicach 7,5 mikronów, a także z cylindrami o średnicy 25 mm złożonymi z 300 drucików wolframowych o średnicy 5,1 mikronów, pokazały emisję impulsów promieniowania rentgenowskiego o całkowitej energii 450 – 800 kJ i prawidłowe skalowanie wyładowań dla czasów rzędu nanosekundy.

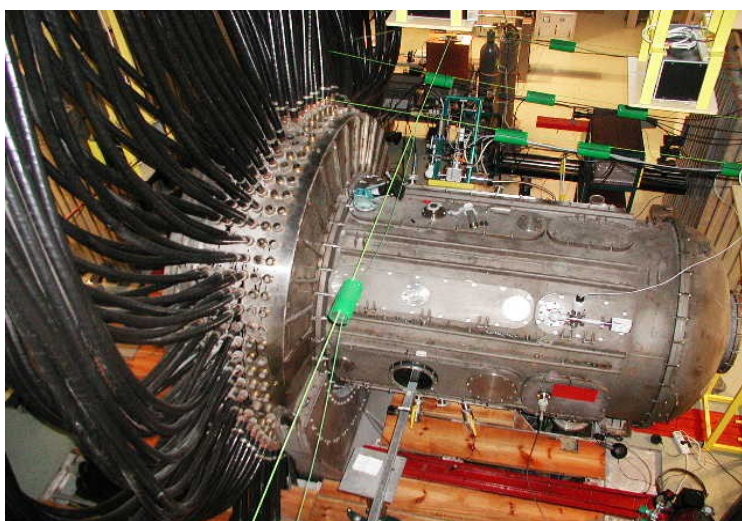


Rys. 9. Target stosowany w układach typu Z-pinch.

Sukces tych eksperymentów spowodowały zmodernizowanie i przebudowę SATURN-a w układ Z-machine, w którym można uzyskiwać prądy o natężeniu 27 Megaamperów..W eksperymentach, które wykonano z cylindrami złożonymi z 480 cienkich drucików wolframowych, uzyskano rekordowe wydajności promieniowania rentgenowskiego o mocy 290 TW, które mogą być wykorzystane do zapłonu termojądrowego według schematu przedstawionego na rys. 9.

Oceny teoretyczne pokazują, że do osiągnięcia zapłonu i odpowiedniej wydajności z reakcji syntezy jądrowej potrzebne będą impulsy rentgenowskie o mocy większej niż 1000 TW i energii ok. 16 MJ. Dla realizacji takich warunków w Sandia Lab. Rozpoczęto budowę układu Z-pinch, nazwanego X-1 Machine [G.Yonas, Scientific American August 1998, s.41].

Jednocześnie z rozwojem badań nad prostymi układami Z-pinch wielkiej mocy nastąpił wzrost zainteresowania układami Plasma-Focus (PF) należącymi do rodziny układów typu Z-pinch. W układzie PF silnoprądowe wyładowanie pomiędzy koncentrycznymi elektrodami wytwarza warstwę zjonizowanego gazu roboczego tzw. warstwę prądową, która pod wpływem własnego pola magnetycznego doznaje najpierw przyspieszenia osiowego, a po dojściu do końca elektrod – radialnej kompresji. Dzięki temu na osi elektrod tworzy się gęste i gorące „ognisko plazmowe” (stąd plasma-focus) o koncentracji jonów rzędu $10^{18} - 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, temperaturze kilku kiloelektronowoltów i czasie trwania rzędu 100 ns. Badania układów typu PF rozpoczęto w Polsce w latach 60.-tych ubiegłego wieku najpierw w Instytucie Badań Jądrowych, a później w Instytucie Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrozyntezy. Prace badawcze i projektowe w IBJ i IFPiLM były podstawą do zaprojektowania i wykonania układu plazmowego Plasma-Focus o energii nominalnej ok. 1MJ, który to układ został uruchomiony w Instytucie Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrozyntezy w Warszawie [M. Sadowski, M. Scholz, 2000 ICPP – Proc. T.2, s.580]. Widok ogólny tego układu przedstawiono na rys. 10.



Rys. 10. Ogólny widok układu PF-1000.

W układzie PF-1000 przeprowadzono kilka serii badań nad dynamiką warstwy prądowej, emisją impulsów promieniowania rentgenowskiego oraz wiązek szybkich jonów i neutronów. Wyposażenie tego układu w elektrody typu Mathera dopasowane do baterii kondensatorów pozwoliło na zrealizowanie pierwszy raz w świecie wyładowań PF o energii 1 MJ uzyskując przy tym dobrze uformowaną kolumnę gęstej i gorącej plazmy. W kilku seriach wyładowań o energii ok. 1 MJ, mimo niepełnej optymalizacji uzyskano emisję neutronów na poziomie $5,5 \cdot 10^{11}$ neutronów/strzał. W układzie PF-1000 nie udało się dotychczas przekroczyć rekordowej wydajności ok. 10^{12} neutronów z wyładowania o energii ok. 500 kJ [24], ale bardzo ważną obserwacją było stwierdzenie, że czas życia kolumny gęstej i gorącej plazmy w

tym układzie jest wyjątkowo długi (250-300 ns) [22]. Wart podkreślenia jest fakt, że prawo skalowania w tych układach związane ze wzrostem emisji neutronów w czwartej potędze prądu jest kwestią dyskusyjną mimo eksperymentów przeprowadzonych na podobnym układzie we Frascati. Prowadzi to do bardzo optymistycznych ocen możliwości przełomowego eksperymentu termojądrowego (breakeven).

Badania zjawisk w PF prowadzone są obecnie w ok. 20 krajach. Polski układ PF-1000 jest obecnie największym na świecie urządzeniem Plasma-Focus. Fakt posiadania takiego urządzenia oraz doświadczenie i dorobek polskich ośrodków plazmowych spowodował, że na terenie IFPiLM utworzono Międzynarodowe Centrum Gęstej Namagnetyzowanej Plazmy (ICDMP) [26]. W pracach Centrum wykorzystując układ PF-1000 uczestniczą specjaliści i stażyści z kilkunastu krajów, co stwarza nowe możliwości badań nad utrzymaniem gorącej plazmy za pomocą jej własnego pola magnetycznego.

2.4. Podsumowanie stanu i perspektywy zastosowań badań t-j na świecie.

W podsumowaniu należy stwierdzić że prace badawcze z zakresu syntezy termojądrowej prowadzone są w świecie bardzo intensywnie. Liczba pracowników naukowych zaangażowanych w te prace wynosi kilka tysięcy, a globalny poziom finansowania nie przekracza 2 mld dolarów rocznie. Co dwa lata odbywa się konferencja światowa nt. syntezy termojądrowej, niezależnie od tego w cyklu corocznym organizowana jest konferencja europejska i kilka konferencji dla wybranych działów fizyki plazmy i technologii. Mimo takiego spektakularnego działania, według opinii uczonych, tempo prac nie jest wystarczająco wysokie, a wynika to z niewystarczającego aktualnie poziomu finansowania.

Należy oczekiwać, że w najbliższej przyszłości prace te będą kontynuowane przy obecnym nakładzie sił i środków. Jest jednak możliwe, że stan ten zmieni się w sensie zwiększenia tempa badań termojądrowych. Taka zmiana może być wywołana przez szereg różnych czynników. Poniżej wymieniono czynniki działające hamująco na prace w zakresie syntezy termojądrowej, a następnie czynniki, które mogą spowodować zmianę punktu widzenia i szybki rozwój prac badawczych i technologicznych.

Do czynników, które działają negatywnie na rozwój badań termojądrowych w świecie można zaliczyć:

- trudności „ujarzmienia plazmy, konieczność zakończenia „poznawczego” etapu prac, wykluczenie niespodzianek wynikających z fizyki zjawisk,

- zbyt złożona konstrukcja reaktorów termojądrowych bezawaryjnego działania, tendencje do bazowania na znanych źródłach energii i ich zasobach (duże stwierdzone w świecie zasoby węgla, złoża uranu, nadzieje związane z „breederami”),

- zbyt długi, z punktu widzenia inwestora, czas zwrotu nakładów w przypadku, gdyby obecnie było podjęte finansowanie programu termojądrowego na dużą skalę,

- konieczność rozwoju syntezy termojądrowej w ramach dużego i złożonego programu we współpracy międzynarodowej,

Można jednak prognozować, że punkt widzenia na energetykę termojądrową może ulec zmianie i to nawet bardzo zdecydowanej. Można wymienić następujące czynniki, które mogą spowodować zwrócenie uwagi na syntezę termojądrową jako na nowe źródło energii:

- sukces prac badawczych w postaci pomyślnie przeprowadzonego eksperymentu przełomowego (breakeven), który wykaże, że ujarzmienie” energii termojądrowej jest możliwe,

- uświadomienie konieczności ochrony i zachowania dla przyszłych pokoleń paliw kopalnych (ropy, gazu i węgla),
- stwierdzenie odczuwalnych bardziej niż obecnie zmian w środowisku, wynikających z zapylenia oraz wyrzucania CO₂ do atmosfery przez elektrownie konwencjonalne,
- pojawienie się kolejnych kryzysów energetycznych i osiągnięcie pułapu możliwości stosowania technologii energooszczędnych,
- niepowodzenie energetyki, z którą obecnie wiązane są zasadnicze nadzieje (wzrost cen za energię elektryczną ze źródeł konwencjonalnych, dalsze awarie elektrowni jądrowych, niezrealizowane „komercjalizacji TM reaktorów powielających (breederów) itp.),
- uzyskanie sukcesu przez jeden kraj (np. USA), który zagrozi zmonopolizowaniem rynku termojądrowego.

2.4.1. Podsumowanie stanu i perspektywy zastosowań badań MCF świecie.

Najważniejszym celem podejmowanych obecnie badań nad energetyką termojądrową w oparciu o tzw. magnetyczne utrzymanie plazmy (Magnetic Confinement Fusion) 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 (*The International Fusion Materials Irradiation Facility*).

Rozwój modeli płaszcza reaktora termojądrowego opartego na nisko-aktywacyjnej stali martenzytycznej z ewentualnymi testami badawczymi na 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 megawatów. Tak ogromna moc przewyższy po raz pierwszy moc dostarczaną w celu wytwarzania plazmy. Innym ważnym kierunkiem badań, który ma być rozwijany podczas przyszłej 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 w ramach, którego działa Polska będzie realizowany w oparciu o następujące projekty:

Światowy projekt ITER – przyszły badawczy reaktor termojądrowy.

Projekt IFMIF – międzynarodowy ośrodek badań materiałowych na potrzeby fuzji termojądrowej (*The International Fusion Materials Irradiation Facility*),

Europejski projekt JET – największe istniejące obecnie na świecie laboratorium fuzji termojądrowej opartej na magnetycznym utrzymaniu plazmy,

Europejski projekt ASDEX-upgrade

Program towarzyszący (badania na urządzeniach Wspólnoty Euratom)

Projekt W7-X – powstający największy w Europie stellarator,

Pozostałe laboratoria fizyki plazmy opartej na utrzymaniu magnetycznym plazmy dysponujące różnej skali tokamakami.

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. 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 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 będą miały badania: dużych okresowych obciążeń cieplnych divertora, efektów szybkich jonów w plazmie centralnej, procesów powstawania i osłabiania niestabilnych struktur plazmowych (tzw. ELM-ów) 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 „pyłu”, 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 deuteru-trytovej). Kolejnym, niezwykle ważnym kierunkiem badań termojądrowych w Europie wydaje się rozwijanie najważniejszych metod diagnostycznych, które zostaną zaimplementowane na reaktorze ITER.

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 kierunki badań powinny przesuwać się w stronę badań własności materiałów, które będą mogły być zastosowane we wnętrzu reaktora DEMO.

Europejski program badań fuzji termojądrowej zorientowany na reaktor badawczy ITER oraz reaktor demonstracyjny DEMO powinny uzupełniać inne działania badawczo-rozwojowe dostarczające zarówno nowych koncepcji teoretycznych, eksperymentalnych, jak 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 w szczególności diagnostyki temperatury jonowej i elektronowej, gęstości elektronowej, diagnostyki neutronowa i cząstek alfa, oraz monitorowanie zanieczyszczeń berylu, węgla, tlenu i wolframu,

Technologia i fizyka wiązek jonowych,

Oddziaływanie silnego promieniowania elektromagnetycznego (zwłaszcza w obszarze mikrofal) ze ściankami tokamaka (reaktora termojądrowego),

Teoretyczne i eksperymentalne badania materiałowe,

Technologia i fizyka magnesów nadprzewodzących.

2.4.2. Podsumowanie stanu i perspektywy zastosowań badań IFE na świecie.

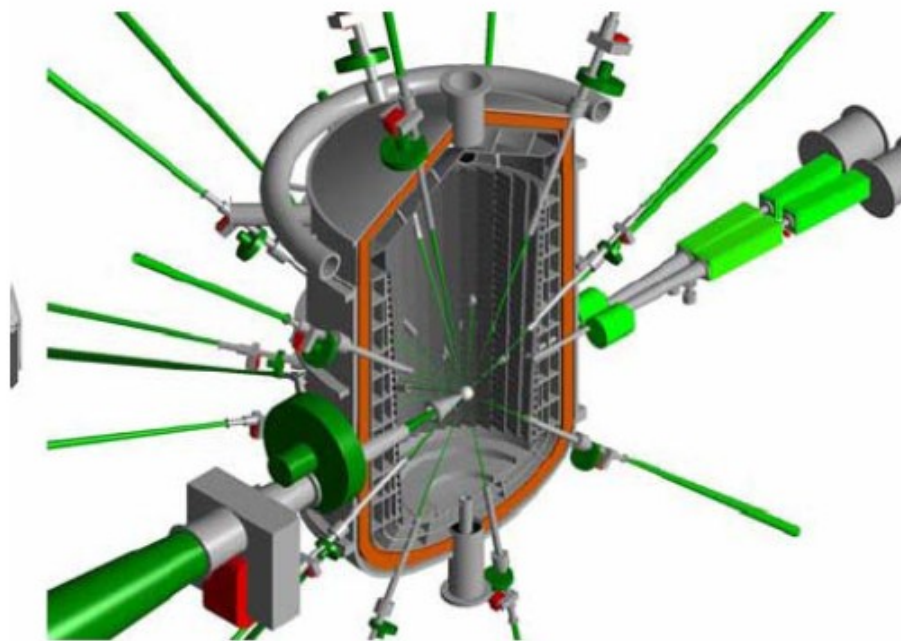
Oprócz projektowanego układu HiPER (pkt 2.2.2.) obecnie kilka wielkich systemów laserowych jest wykorzystywanych, budowanych lub planowanych do badania różnych aspektów ICF w wersji zapłonu centralnego (NIF i LMJ) i w wersji z szybkim zapłonem (pozostałe układy):

- NIF-PW [1.8 MJ, kilkanaście ns, 192 wiązki + 20 wiązek po 2,5kJ] w LLNL (USA) uruchamiany NIF z centralnym zapłonem,
- OMEGA EP [30 kJ, 60 wiązek, kilka ns + 2x2,6kJ, 2 wiązki, 10ps i 100ps] w LLE (Rochester, USA) – działający,
- ZR (multi-MA Z-pinch) + Z-Beamlet [2kJ, 10ps] w SNL (Sandia, USA) – działający,
- LMJ [2.4MJ, ~10ns] w ILP (Bordeaux, France) – w budowie,
- PETAL [60kJ, kilka ns, 8 wiązek + 3,5kJ, 0,5-10ps] w ILP (Bordeaux, France) – w budowie,
- VULCAN PW [600J/0.5ps] RAL (Rutherford, UK) – działający,
- FIREX I [GKKO12: 10kJ, 10 wiązek, 2ns + 10kJ, 10ps], ILE (Osaka, Japan) – uruchamiany,
- FIREX II [50kJ, wiele wiązek ~10ns + 50kJ, 20ps], ILE (Osaka, Japan) – planowany,
- SG-IIU [18kJ, 3ns, wielowiązkowy + 1,5kJ, 2ps] (Shanghai, China) – w budowie.

Oprócz tego działa wiele samodzielnych układów laserowych wielkiej mocy, które wykorzystywane są do badania zjawisk fizycznych związanych z szybkim zapłonem.

Opracowywane są różne projekty budowy doświadczalnego laserowego reaktora termojądrowego. W Europie planuje się uruchomienie infrastruktury HiPER do ok. 2020 roku w wariantcie z szybkim zapłonem z zastosowaniem lasera repetytywnego dla zademonstrowania wydatku energii termojądrowej 50-100 razy większego od dostarczonej energii laserowej (pkt 2.2.2). Następnym etapem będzie dopracowanie systemu HiPER i budowa na tej podstawie europejskiego prototypowego laserowego reaktora FIF około roku 2030. Do innych, bardzo zaawansowanych projektów laserowych reaktorów termojądrowych należy zaliczyć: HILIFE – projekt udoskonalany od ok. 30 lat, KOYO – projekt japoński udoskonalany od ok. 30 lat, LIFE - najnowszy projekt amerykański – prototyp reaktora w 2020, a od 2030 - budowa komercyjnych reaktorów energetycznych.

Perspektywa realizacji tych projektów zależy od długofalowych strategii rozwoju źródeł energii formułowanych w Europie, w Stanach Zjedn. i Japonii i potencjału naukowego, technologicznego i środków finansowych przeznaczanych na realizację tych strategii. W perspektywicznych planach rozwoju najbardziej wydajnych źródeł energii uwzględniane są nowoczesne reaktory jądrowe, reaktory termojądrowe typu tokamak i reaktory laserowe. Wszystkie projekty reaktorów termojądrowych opracowywane są także w wersji hybrydowej z płaszczem z materiału rozszczepialnego. Jedną z koncepcji laserowego reaktora termojądrowego jest widoczna na rys. 10.



Rys. 10. Schemat ideowy laserowego reaktora termojądrowego.

Znaczenie i międzynarodowe finansowanie programów IFE prawdopodobnie wzrośnie po zademonstrowaniu w układzie NIF w latach 2010-11 i LMJ w latach 2012-13 efektywnej produkcji energii t-j (a więc znacznie wcześniej niż jest to planowane w przypadku MCF) w skali umożliwiającej w następnym etapie budowę laserowego reaktora t-j.

3. STAN BADAŃ TERMOJĄDROWYCH W KRAJU

Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy (IFPiLM) jest najważniejszym polskim ośrodkiem prowadzącym badania w zakresie fuzji termojądrowej w wersji MCF (z magnetycznym utrzymaniem plazmy), koordynuje te badania w ramach Asocjacji Euratom. Jest też jedynym w Polsce ośrodkiem prowadzącym badania związane z opracowaniem syntezy termojądrowej z wykorzystaniem laserów (ICF).

W IFPiLM istnieje urządzenie PF-1000 do wytwarzania plazmy o parametrach t-j jak i aparatura diagnostyczna do jej badania. Na PF-1000 prowadzone są kompleksowe eksperymenty plazmowe wraz z ich pełną analizą naukową oraz symulacje komputerowe zjawisk obserwowanych w tych eksperymentach. Aparatura badawcza, którą dysponuje instytut została w przeważającej większości zbudowana przez pracowników tego instytutu w ciągu ostatnich 15 lat. Prowadzone badania charakteryzują się wysokim poziomem naukowym i zyskały uznanie międzynarodowe.

3.1. Stan prac w zakresie MCF w ośrodkach krajowych

Prace dotyczące MCF są koordynowane w ramach Asocjacji Euratom IPPLM i są mocno skoordynowane z programem Wspólnoty Europejskiej. Ponieważ w kraju nie posiadamy układu typu tokamak, to nasze zaangażowanie koncentruje się na programie EFDA ,pracach związanych z tokamakiem JET oraz projektem W7-X. Można powiedzieć, że program Polskiej asocjacji ogniskuje się wokół tych trzech projektów. I tak w przypadku JET, jest to fizyka plazmy i diagnostyka, głównie diagnostyka neutronowa i spektroskopowa. W programie EFDY, polskie zespoły badawcze biorą udział w następujących projektach:

Modelowanie tokamaków (IFPiLM, IFJ, ZUT, UO)

Oddziaływanie plazma ścianka (IFPiLM, PW)

Materiały fuzyjne (PW)

Diagnostyki (IFPiLM, IFJ, IPJ)

Pył i detrytacja (IFPiLM)

Wreszcie w projekcie W7-X Polska jest zaangażowana w prace związane z :

Montażem cewek nadprzewodzących (IFJ);

Obliczeniami wytrzymałościowymi elementów konstrukcji stelleratora (PW);

Diagnostykami neutronową i spektroskopią rentgenowską (IFPiLM i IFJ);

Pracami studyjnymi nad rozwojem systemu wiązek neutralnych atomów do grzania plazmy w W7-X (IPJ);

(skrótów oznaczają następujące instytucje IFPiLM – Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy, PW – Politechnika Warszawska, IFJ – Instytut Fizyki Jądrowej, IPJ –Instytut Problemów Jądrowych, UO – Uniwersytet Opolski).

Główne kierunki badań realizowane przez polskie ośrodki naukowe zrzeszone w asocjacji Euratom-IFPiLM w ramach europejskiego programu fuzji termojądrowej można podsumować następująco:[Raportu roczny 2008 asocjacji Euratom-IFPiLM]

Badania eksperymentalne i modelowanie plazmy w europejskim laboratorium JET

Diagnostyka rentgenowska i VUV

Aktywacyjna diagnostyka neutronowa

Modernizacja systemu aktywacyjnej diagnostyki neutronowej

Modelowanie numeryczne zagadnień transportu i MHD w plazmie

Teoria i modelowanie dla ulepszenia koncepcji pracy tokamaka oraz dla ITER-a

Dynamika nieliniowa szybkich jonów w okolicach progu niestabilności struktur plazmowych

Stochastyczne procesy i ich odwzorowanie w kinetycznych równaniach gazu naładowanych cząstek

Diagnostyka plazmy

Spektroskopia miękkiego promieniowania rentgenowskiego za pomocą szybkich detektorów półprzewodnikowych na potrzeby diagnostyki stelleratora W7-X

System monitorujący zanieczyszczenia węgla i tlenu na potrzeby diagnostyki stellaratora W7-X

Rozwój mikrofalowych metod diagnostycznych

Diagnostyka neutronów i obliczenia transportu neutronów

Rozwój metod detekcyjnych opóźnionych neutronów z aktywacyjnych materiałów rozszczepialnych w urządzeniach plazmowych

Zagadnienia utrzymania i transportu energii i cząstek w plazmie

Modelowanie pracy Tokamaka

Zagadnienia erozji i ponownego osadzania komponentów tokamaka TEXTOR sąsiadujących z plazmą

Fizyka wysoko energetycznych cząstek

Rozwój detektorów Čerenkova na potrzeby pomiarów szybkich elektronów – nowa diagnostyka na tokamaku Tore-Supra

Rozwój i zastosowanie diagnostyk neutronowych na potrzeby plazmy utrzymywanej polem magnetycznym

Zastosowanie śladowych detektorów półprzewodnikowych (SSNTDs) na potrzeby pomiarów eksperymentalnych szybkich jonów i produktów fuzji termojądrowej na tokamaku TEXTOR

Prace w zakresie MCF są realizowane zgodnie z rocznymi planami pracy Asocjacji przygotowanymi co roku z uwzględnieniem wyżej wymienionych celów i strategią rozwoju programu europejskiego.

Każdego roku wyniki prac realizowanych w ramach tych tematów są podsumowywane w raporcie rocznym, weryfikowane pod kątem otrzymanych rezultatów i europejskiego programu w zakresie MCF.

3.2. Stan prac w zakresie IFE w ośrodkach krajowych

Prace dotyczące IFE prowadzone są w Oddziale Plazmy Laserowej (OPL) w IFPiLM od ponad 30. Dotyczą one zastosowań laserów do badań w zakresie laserowej syntezy t-j, fizyki oddziaływań laser-materia i różnych technologicznych zastosowań laserów. Od paru lat prowadzone są w tym Oddziale również prace w zakresie MCF. **W OPL realizowane są w szczególności następujące prace:**

- teoretyczne i eksperymentalne badania laserowej akceleracji protonów w odniesieniu do tzw. protonowego szybkiego zapłonu skompresowanego DT (IFE),
- eksperymentalne badania optymalizacyjne generacji strumieni plazmy laserowej i laserowego przyspieszania makrocząstek w odniesieniu do wykorzystania tych efektów także dla szybkiego zapłonu skompresowanego paliwa DT (IFE),
- zastosowania technologii laserowych dla usuwania kodepozytu z elementów wewnętrznych komór tokamaków TEXTOR i ASDEX UG (MCF),
- rozwój nowoczesnych diagnostyk plazmy laserowej niezbędnych dla badań dotyczących laserowej syntezy termojądrowej, w tym diagnostyki jądrowe i rentgenowskie oraz interferometria 3-kadrowa (IFE),

- przygotowywanie diagnostyk rentgenowskich dla badań plazmy w budowanym stellaratorze Wendelstein-7X i tokamaka JET (MCF).

Część wyżej wymienionych badań realizowana jest w laboratorium Oddziału Plazmy Laserowej w IFPiLM wyposażonym w następującą **infrastrukturę badawczą**:

- laser wielkiej mocy (10 TW, 40 fs) dla badań oddziaływań laser-materia; laser będzie zainstalowany w IFPiLM w styczniu przyszłego roku,
- dwa małe lasery repetytywne dla proc technologicznych,
- diagnostyki jonowe, rentgenowskie i optyczne (spektrometr i interferometr) dla badań plazmowych,
- cztery plazmowe komory eksperymentalne,
- laboratorium technologiczne dla przygotowania tarcz naświetlanych laserem i dla badań materiałowych.

IFPiLM jest obecnie jedynym polskim formalnym realizatorem prac fazy przygotowawczej projektu HiPER (pkt 2.2.2). Uczestniczy on w dwóch pakietach organizacyjnych, w dwóch pakietach fuzyjnych (WP9 i WP10) oraz pakiecie dotyczącym badań podstawowych (WP12). Działalność IFPiLM w pracach dotyczących fuzji koncentruje się na dwóch zagadnieniach:

- opracowaniu źródła protonów o ultrawysokim natężeniu ($I_p \sim 1020 \text{ W/cm}^2$) dla realizacji protonowego szybkiego zapłonu (PFI) (np. [Badziak et al., JAP 104(2008)063310];
- laserowej akceleracji mikropocisków dla potrzeb szybkiego zapłonu zderzeniowego (np. [Badziak et al., APL 92(2008)211502]).

W pakiecie dotyczącym programu badań podstawowych (WP12) IFPiLM realizuje prace związane z astrofizyką laboratoryjną (m.in. generacja i oddziaływanie z gazem tzw. jetów plazmowych [Kasperczuk et al., APL 94(2009)081501; Kasperczuk et al., LPB 27(2009)115]), laserową akcelerację jonów przy relatywistycznych natężeniach promieniowania laserowego oraz reakcjami jądrowymi indukowanymi laserem. Wszystkie powyższe prace – obejmujące analizy teoretyczne, zaawansowane symulacje numeryczne oraz eksperymenty – prowadzone są przy szerokiej współpracy międzynarodowej, głównie z ośrodkami uczestniczącymi w projekcie HiPER.

Dla potrzeb modelowania szybkiego zapłonu protonowego, a głównie dla symulacji laserowej generacji intensywnych wiązek protonów, w IFPiLM **opracowano relatywistyczny, dwupłynowy kod 2D oraz relatywistyczne kody (1D i 2D) typu PIC**. Kod dwupłynowy został wykorzystany m.in. do zbadania własności tzw. skinowej akceleracji ponderomotorycznej [Badziak et al., APL 89(2006)061504]. Kody PIC są wykorzystywane do badania mechanizmów i własności akceleracji protonów przy bardzo wysokich natężeniach impulsu laserowego (10^{19} – 10^{21} W/cm^2), a także dla interpretacji wyników doświadczalnych [Badziak et al., J. Appl. Phys. 104, 063310, 2008]. Dla symulacji różnych aspektów szybkiego zapłonu protonowego zespół IFPiLM współpracuje z zespołami z Madrytu i Rzymu, które dysponują zaawansowanymi kodami płynowymi umożliwiającymi modelowanie kompresji i spalania paliwa DT.

W IFPiLM realizowane są następujące projekty sponsorowane przez **Asocjacje EURAROM – IFPiLM** dotyczące MCF:

- laserowe usuwanie kodepozytu z elementów wewnętrznych komór tokamaków TEXTOR i ASDEX i badania za pomocą laserów repetytywnych w IFPiLM,

- przygotowywanie dwóch rodzajów diagnostyk rentgenowskich dla badań plazmy w budowanym stellaratorze Wendelstein-7X i tokamaka JET.

W OPL IFPiLM realizowane są także różne prace dotyczące oddziaływań laser-materia wiążące się z laserowym szybkim zapłonem paliwa DT i w ramach różnych programów międzynarodowych wymienionych wyżej (HiPER, EURATOM_IFE, IAEA_CRP, LASERLAB-Europe, COST i SILMI). Badania prowadzone w ramach „EURATOM_IFE keep-in-touch activity” dotyczą różnych aspektów IFE i są finansowane w małym zakresie ze środków będących w dyspozycji Asocjacji Euratom – IFPiLM. Zespoły z IFPiLM realizują projekty sponsorowane przez LASERLAB-Europe w laboratorium PALS w Pradze z udziałem uczonych z innych ośrodków. W 2007 roku zespół IFPiLM we współpracy z innymi zespołami wykonał w laboratorium LULI w Palaiseau (koło Paryża) ważny eksperyment sponsorowany także przez LASERLAB-Europe dotyczący laserowej akceleracji szybkich protonów dla protonowego szybkiego zapłonu.

OPL IPPLM współpracuje między innymi z następującymi ośrodkami przy realizacji prac w zakresie IFE: Institute of Physics AS CR, Prague, CR, PALS Research Centre AS CR, Prague, LULI, Palaiseau, France, RAL Rutherford, UK, University of Bordeaux, France, University of Madrid, Spain..

Przy realizacji prac dotyczących MCF IFPiLM współpracuje między innymi z następującymi laboratoriami: FZJ-Forschungszentrum, Jülich, Germany, The Alfvén Lab., Stockholm, Sweden, Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP), Garching and Greifswald, Germany JET Culham, UK.

3.3. Stan prac w zakresie Z-pinch i Plasma-Focus w ośrodkach krajowych

Głównym urządzeniem badawczym, wokół którego ogniskuje się cały program naukowy IFPiLM i po części zespołu plazmowego IPJ związany z badaniami nad plazmą termojądrową utrzymywaną i komprymowaną polem magnetycznym, promieniowaniem emitowanym z plazmy o takich parametrach 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. Urządzenie to działa na bazie Ze względu na swoje parametry techniczne oraz wyposażenie diagnostyczne jest urządzeniem pozwalającym na wykonywanie wielu interesujących eksperymentów z zakresu plazmy termojądrowej. Energia elektryczna z baterii kondensatorów jest przekazywana poprzez nisko-indukcyjne kable do kolektora, a następnie do elektrod układu. Obecnie układ PF-1000 może pracować z różnego rodzaju elektrodami zewnętrznymi.

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 1 MJ zgromadzoną w baterii.

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;

Przygotowanie 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;

Programem EURATOM na podstawie kontraktu zawartego z European Atomic Energy Community; Association-IPPLM; Nr FU06-CT-2004-00081;

6-tym programem ramowym Infrastructure-5, Transnational Access to Major European Facilities, "Megajoule Plasma-Focus PF-1000. '026095(RITA) MJPF-1000'";

Umowy o współpracy w zakresie rozwoju diagnostyk dla stelleratora W7-X pt. NEUTRON DIAGNOSTICS FOR W7-X zawarta w dniu 1/01/2006 do 31/12/2008 z Max-Planck-Institut für Plasmaphysik Teilinstitut Greifswald Wendelsteinstrasse 1D- 17491 Greifswald, Germany;

Projektem 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 będą 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.

Warto również podkreślić, że zdobyta wiedza podczas eksploatacji generatora silnoprądowego wiedza posłużyła do zbudowania generatorów służących do symulacji wyładowań atmosferycznych, co umożliwiło powołanie akredytowanego przy PCA (nr. Akredytacji AB107) Laboratorium Symulowanych Wyładowań Atmosferycznych, w którym między innymi badane są obiekty latające zgodnie z normami międzynarodowymi.

4. PERSPEKTYWY I UWARUNKOWANIA ROZWOJU W POLSCE PRAC W ZAKRESIE SYNTEZY TERMOJADROWEJ

4.1. Perspektywy rozwoju prac w zakresie MCF realizowanych przez polskie ośrodki w ramach Programu EURATOM:

W 2005 roku Polska podpisując umowę akcesyjną z Unią Europejską stała się częścią wspólnoty EURATOM, a podpisując Kontrakt Asocjacyjny wraz z umowami towarzyszącymi zaczęła realizować wspólny program badań nad syntezą termojądrową. Do tej pory program krajowy był z racji posiadanych układów eksperymentalnych i infrastruktury skoncentrowany na badaniach nad syntezą jądrową w układach Z-Pinch oraz syntezą laserową, podczas gdy program europejski jest w głównej mierze oparty o toroidalne pułapki magnetyczne typu Tokamak, które w Europie są głównymi urządzeniami badawczymi.

Jeśli mamy dokonać właściwego wyboru dotyczącego rozwoju prac w zakresie MCF w tym obszarze, to powinniśmy sobie uświadomić, że obecnie środek ciężkości badań i rozwoju w zakresie fuzji przesunął się obecnie z badań fizyki plazmy (bardzo gorącego, zjonizowanego gazu), w której następuje reakcja fuzji, w kierunku technologii niezbędnych do działania elektrowni, a także do opracowania materiałów odpornych na ekstremalne warunki panujące we wnętrzu reaktora. W związku z tym następne zaplanowane kroki to budowa Międzynarodowego Eksperymentalnego Reaktora Termojądrowego (International Tokamak Experimental Reaktor – ITER) i propozycja budowy Międzynarodowego Urządzenia do Badania Materiałów (International Fusion Materials Irradiation Facility – IFMIF). Jeżeli oba te kroki zostaną podjęte równocześnie (jest to tak zwana szybka ścieżka – „fast track” – promowana przez grupę ekspertów europejskich pod kierunkiem Głównego Doradcy Naukowego Rządu Wielkiej Brytanii), to za mniej więcej 30 lat prototypowa elektrownia będzie mogła generować prąd na poziomie gigawatów.

Realizacja szybkiej ścieżki („fast track”) prowadzącej do ITER-a i pierwszego komercyjnego reaktora termojądrowego DEMO będzie wymagała rozwiązania wielu problemów z zakresu oddziaływania plazmy o temperaturze wielu milionów stopni ze ściankami reaktora. Europejski program związany z tymi zagadnieniami ustanowiono, aby dostarczyć informacji o problemach związanych z oddziaływaniami plazmy ze ściankami reaktora (tzw. Plasma Wall Interaction – w skrócie PWI), a w szczególności informacji o spodziewanym czasie życia ścian reaktora i retencji paliwa termojądrowego, którym będą izotopy wodoru – deuter i tryt. Poznanie tych zagadnień umożliwi zaprojektowanie i przebadanie materiałów do wykorzystania w urządzeniu ITER i DEMO. Program ten jest zogniskowany na najważniejszych problemach materiałowych ITER-a i przyszłego reaktora termojądrowego. Główne cele badań naukowych i prac badawczo-rozwojowych tego programu zdefiniowano w sposób następujący:

Zaprojektowanie pierwszej ścianki reaktora oraz divertora odbierającego ciepło z reaktora ze względu na ich skład i konstrukcję;

Zastosowanie odpowiedniej techniki i materiałów w celu kontroli retencji paliwa termojądrowego oraz erozji ścian;

Uzyskanie doświadczenia związanego z wybranymi materiałami z punktu widzenia impulsowej depozycji ciepła na ściankach reaktora i jego divertorze w trakcie występowania zjawisk zerwania sznura plazmowego (tzw. disruption) i ELM (Edge Localized Mode).

Z opracowywanych w Europie programów badań termojądrowych i dotychczasowego zaangażowania polskich zespołów naukowych wynika, że w najbliższej perspektywie czasowej realizacja 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 budową odpowiedniej infrastruktury

badawczej. W warunkach pracy tokamaka JET a tym bardziej tokamaka ITER nie jest możliwe testowanie urządzeń 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.

Inną częścią europejskiego programu termojądrowego, który może i powinien być realizowany przez polskie ośrodki naukowe jest modelowania numeryczne parametrów plazmy oraz własności materiałów, które w przyszłości będą mogłyby użyte do budowy odpowiednich komponentów reaktora termojądrowego. Również w tej dziedzinie konieczne są inwestycje związane z zakupem nie tylko sprzętu komputerowego najwyższej klasy lecz również oprogramowania, takiego jak choćby pakiet *IDL*, który będzie najprawdopodobniej głównym środowiskiem programistycznym 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.

4.2. Perspektywy rozwoju prac w zakresie IFE realizowanych przez polskie ośrodki w ramach Projektu HiPER i innych programów międzynarodowych

Mimo prowadzenia badań eksperymentalnych i teoretycznych w zakresie syntezy termojądrowej z inercyjnym utrzymaniem plazmy w bardzo wielu laboratoriach na świecie od kilkudziesięciu lat jeszcze wiele zagadnień dotyczących fizyki termojądrowej plazmy laserowej wymaga dalszych badań. W Polsce takie prace prowadzone są od ponad 30 lat wprawdzie w jednym ośrodku - w IFPiLM, ale w bardzo szerokiej współpracy międzynarodowej. Obecnie wzrasta intensywność prac w tym zakresie spowodowana koniecznością uzupełnienia zasobu wiedzy niezbędnego dla budowy laserowych instalacji termojądrowych skali przedreaktorowej. Ważnymi bodźcami dla rozwoju tych badań są pojawiające się nowe idee dla realizacji syntezy laserowej znacznie zmniejszające wymagania techniczne konieczne dla uzyskania efektywnej syntezy t-j (na przykład różne warianty „szybkiego zapłonu”). Wobec **znaczenia badań laserowo-plazmowych dla zrealizowania perspektyw energetycznych syntezy laserowej** i wobec dotychczasowych osiągnięć i doświadczenia polskich naukowców jest w pełni **uzasadnionym zwiększenie potencjału aparaturowego jak i kadrowego dla uzyskania jeszcze większej efektywności prowadzonych w Polsce prac i dla zwiększenia polskiego udziału we współpracy międzynarodowej.**

Zespół uczonych z IFPiLM uczestniczy w fazie przygotowawczej, realizowanej w latach 2007-2011, którego celem jest budowa wielkiej europejskiej infrastruktury laserowej dla zademonstrowania efektywności syntezy laserowej z szybkim zapłonem (pkt 2.2.2). Dwupłynowy kod hydrodynamiczny 2D oraz relatywistyczne kody (1D i 2D) typu PIC opracowane i stosowane w IFPiLM do badań dotyczących protonowego szybkiego **zapłonu** posłużą do **opracowania projektu koncepcyjnego laserowego akceleratora protonów dla szybkiego zapłonu w układzie HiPER.**

Ważną zaletą programu IFE, także projektu HiPER, jest infrastrukturalne połączenie badań ukierunkowanych na energetyczne zastosowanie syntezy laserowej z rozwojem prac

podstawowych w kierunkach np.: laserowej akceleracji cząstek, niektórych procesów jądrowych, metod diagnostyki i terapii medycznej, fizyki gorącej i gęstej materii, symulacji zjawisk astrofizycznych, elektrodynamiki kwantowej i innych.

Realizacja projektu HiPER stwarza możliwości europejskim ośrodkom badawczym i przedsiębiorstwom przemysłowym, w tym także polskim, podejmowania nowych, ważnych zadań w dużym stopniu finansowanych ze środków UE. Te zadania nie są powiązane tylko z projektem HiPER, ale mają dłuższą perspektywę związaną z wdrażaniem energetyki termojądrowej w ciągu kolejnych dziesięcioleci. Wśród realizatorów tych prac powinno znaleźć się **jak najwięcej polskich laboratoriów i firm korzystających ze wsparcia europejskiego** przy realizacji tych ambitnych przedsięwzięć. To zaangażowanie będzie sprzyjać też upowszechnieniu problematyki syntezy laserowej w kraju rzutując na rozwój różnych pokrewnych dziedzin nauki i technologii. Wynika to także z możliwości wykorzystywania infrastruktury przygotowanej dla syntezy laserowej także dla postępu w różnych dziedzin badań podstawowych, których rozwój w Polsce jest bardzo pożądanym.

W długoletniej perspektywie ważne jest przyszłe, **po 2020 roku, wykorzystywanie infrastruktury HiPER przez polskie zespoły dla optymalizacji procesu syntezy laserowej w skali energetycznej i dla badania różnych ekstremalnych zjawisk wywołanych oddziaływaniami relatywistycznymi**. Skrótowo możliwe dziedziny badań, które można będzie realizować z użyciem systemu laserowego HiPER przedstawiono w pkt 2.2.2. niniejszej Ekspertyzy. Sprzyjać temu będą prace realizowane w latach wcześniejszych przez polskie zespoły przy uwzględnieniu niezbędnego zwiększenia potencjału zaangażowanego w te prace i poszerzenie ich zakresu. W takiej skali czasowej powinny być w Polsce też przygotowywani specjaliści w różnych dziedzinach nauki i technologii związanych z wdrażaniem energetyki termojądrowej.

4.3. Perspektywy rozwoju prac w zakresie syntezy termojądrowej realizowanych na układach Z-pinch i Plasma-Focus.

Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy jest wiodącym w świecie ośrodkiem badającym plazmę o parametrach termojądrowych w układach Plasma-Focus. Badania w Instytucie prowadzone są na największym tego typu układzie na świecie PF-1000, o maksymalnej energii elektrycznej gromadzonej w baterii rzędu 1 megajoula. W układzie PF-1000, w wyniku wyładowania baterii kondensatorów w wypełnionej deuterem przestrzeni między dwiema koncentrycznymi współosiowymi elektrodami powstaje kolumna plazmowa w postaci walca o wymiarach: długość 8-10 cm, i średnicy ok. 5 mm. Zgęstek ten posiada gęstość 10^{19} cm^{-3} oraz temperaturę ponad 1 keV i czas utrzymania około 500 ns, a więc są to termojądrowe parametry plazmy. Plazma ta jest silnym źródłem neutronów termojądrowych. Z reakcji deuter-deuter w jednym wyładowaniu otrzymuje się 10^{11} - 10^{12} neutronów. Do niedawna było to najsilniejsze źródło neutronów termojądrowych. Jest to urządzenie, które potencjalnie ma szansę rozwinąć się jako intensywne impulsowe źródło neutronów prędkich o energiach 2,45 MeV z reakcji D-D lub neutronów 14 MeV z reakcji D-T. Takie źródło może mieć zastosowanie w przyszłych reaktorach hybrydowych typu Fission-Fusion lub do badań materiałowych związanych z oddziaływaniem neutronów szczególnie 14 MeV z materiałami, które mogą być wykorzystane w przyszłym reaktorze t-j czy to działającym w oparciu o ICF czy też MCF. W związku z tym cały program badawczy na tym układzie powinien być skoncentrowany na wyjaśnieniu zjawisk związanych z prawem skalowania wiążącym wzrost emisji neutronów w czwartej potęgze prądu. Jednocześnie powinny być prowadzone prace związane z rozwojem różnego rodzaju diagnostyk wysokotemperaturowej plazmy, mających zastosowania w układach np. typu JET lub ITER, czy W7-X.

4.4. Podsumowanie korzyści wynikających z rozwoju badań termojądrowych w Polsce

4.4.1. Warunki rozwoju badań termojądrowych w Polsce

Perspektywy rozwoju badań termojądrowych i ich przyszłych zastosowań dla wdrożenia energetyki termojądrowej staną się w pełni realne przy spełnieniu kilku warunków. Jednym z najważniejszych warunków jest **zapewnieni odpowiedniego poziomu finansowania planowanych prac**. Środki te powinny być przeznaczona na następujące cele:

- dofinansowanie prac sponsorowanych w ramach Wspólnoty EURATOM i w ramach różnych programów międzynarodowych (np: wymienionych w pkt. 4.2),
- znaczne zwiększenie infrastruktury badawczej – głównie zakupu i budowy nowoczesnych układów do generacji plazmy, takich jak laser wielkiej mocy i urządzenie do symulacji oddziaływań plazma – ścianka,
- znaczące zwiększenie funduszu osobowego dla umożliwienia zatrudnienia młodej kadry naukowej i wyspecjalizowanego personelu technicznego.

Zgodnie z tendencją światową, także w Polsce powinno wzrastać zaangażowanie ośrodków badawczych i przemysłowych w realizację prac badawczo-rozwojowych w zakresie energetyki t-j. Aby to osiągnąć, obok zaangażowania większych funduszy, niezbędne są zorganizowana **działania informacyjne i promocyjne dotyczące tej problematyki**. Takie działania mogłyby być zaplanowane i zainicjowane przez krajowy zespół koordynujący prace w zakresie energetyki t-j (proponowany poniżej). Odpowiednio upowszechniana informacja na temat fuzji t-j jest niezbędna także dla zwiększenia liczby pracowników naukowych i technicznych zainteresowanych pracą w tej dziedzinie.

Utworzenie systemu kształcenia kadry naukowej wyspecjalizowanej w dziedzinach wiążących się z badaniami termojądrowymi jest innym ważnym warunkiem stymulującym rozwój tych badań. Chodzi tu o kształcenie w kierunkach takich jak: fizyka plazmy gorącej (termojądrowej), diagnostyka takiej plazmy, technika laserów dużej mocy, neutronika, inżynieria materiałowa, technologia wysokiej próżni i inne. Należy rozpatrzeć różne formy kształcenia młodych naukowców i inżynierów.

Osobnym i obecnie trudnym do spełnienia warunkiem zwiększenia polskiego udziału w przygotowania przyszłej energetyki t-j jest **zaangażowanie polskiego przemysłu do realizacji zamówień dotyczących techniki i technologii t-j**. Dla zaktywizowania polskich firm w staraniach o przyszłe zamówienia w wyżej wymienionym zakresie niezbędne jest podjęcie przez środowiska naukowe i gospodarcze wspólnych przedsięwzięć organizacyjnych dla stworzenia forum niezbędnego do wymiany informacji i przygotowania konkretnych zamówień. Utworzenie takiego forum nie będzie łatwe i powinno być poprzedzone szeroką kampanią informacyjną z włączeniem struktur organizacyjnych Wspólnoty EURATOM, projektu HiPER i innych projektów europejskich. Należałoby też rozpoznać możliwość wykorzystania przez polskie przedsiębiorstwa doświadczeń przemysłowych korporacji międzynarodowych w pozyskiwaniu zamówień dotyczących technologii termojądrowych.

4.4.2. Konieczność przygotowania długofalowej strategii rozwoju badań t-j w Polsce

Oceniając znaczenie opanowania i wdrożenia produkcji energii dla rozwoju cywilizacyjnego i ekonomicznego w skali światowej w najbliższych dziesięcioleciach **należy także w Polsce przygotować warunki dla efektywnego uczestnictwa w programie przygotowującym energetykę termojądrową**. Jak wyżej pokazano program ten łączy się z rozwojem wielu innych „nie-energetycznych” dziedzin badań podstawowych i aplikacyjnych. Uzyskanie oczekiwanych korzyści z rozwoju prac w tych dziedzinach także jest uwarunkowany niezbędnymi przygotowaniem infrastrukturalnymi i organizacyjnymi.

Celowym jest przygotowanie ogólnokrajowej długofalowej strategii rozwoju badań i zastosowań syntezy termojądrowej w kraju w powiązaniu z programami europejskimi i międzynarodowymi dotyczącymi tych zagadnień. Strategia krajowa winna być częścią składową długofalowych programów europejskich, przede wszystkim Wspólnoty EURATOM i projektu HiPER. Propozycja takiej strategii powinna być przygotowana przez **zespół ekspertów** z ważniejszych krajowych ośrodków prowadzących obecnie prace w wyżej wymienionym zakresie. W tym zespole powinni uczestniczyć specjaliści z pokrewnych dziedzin, takich jak energetyka (w tym perspektywy zapotrzebowania, rozwoju i zastosowań różnych źródeł energii elektrycznej w kraju), ekologia i ochrona radiologiczna (w powiązaniu z produkcją energii i ochroną środowiska), nowe technologie (ultra-wysoka próżnia, nadprzewodnictwo elektryczne, nowe materiały, technologia trytu, technologia laserów dużej mocy i inne).

Do ustalenia jest umocowanie organizacyjne i nadzór nad pracami takiego zespołu oraz jego program i harmonogram prac. Pierwszym krokiem dla utworzenia zespołu opracowującego długoletnią strategię rozwoju badań termojądrowych w kraju i ich zastosowania dla produkcji energii bezpiecznej dla ludności i środowiska byłoby zaproszenie do tego zespołu **naukowców zaproponowanych przez rady naukowe ośrodków realizujących te prace i zamierzające dalej je rozwijać**. Zespół taki mógłby być umocowany np. w Konsorcjum Atomistyki skupiającym instytuty IPJ, IEA, ITAJ i IFPiLM.

4.4.3. Oczekiwane korzyści naukowo-technologiczne, gospodarcze i społeczne wynikające z rozwoju badań t-j w Polsce

Wielkie zalety opanowania i wdrożenia energetyki termojądrowej w skali światowej dla zaspokojenia rosnącego zapotrzebowania na energię „czystą” i bezpieczną, krótko wymienione we wstępie do niniejszej Ekspertyzy, **będą także ważne dla rozwoju gospodarczego i cywilizacyjnego Polski**. Dla efektywnego uczestnictwa polskiej nauki i techniki w przygotowaniu tej energetyki jest niezbędna dla przyszłego jej wykorzystywania dla potrzeb kraju. Uczestnictwo w tym wielkim przedsięwzięciu powinno obejmować różne dziedziny i powinno być realizowane różnymi metodami, jak to omówiono skrótowo w pkt 1. Będzie to największym pozytywnym wynikiem rozwoju badań syntezy t-j w Polsce, który osiągać trzeba przy spełnieniu warunków podanych powyżej w pkt 4.4.1.

Program rozwoju badań t-j powiązany będzie z **rozwojem badań w różnych innych dziedzinach** jak to uzasadniono w pkt 4. Dotyczy to szczególnie prac w zakresie syntezy laserowej, gdzie wielkie i nowoczesne lasery budowane dla przygotowania energetyki t-j będą też stosowane do innych badań. W zakresie MCF będą też występowały powiązania z innymi obszarami badań – głównie w zakresie unikalnych technologii. Polska, jako uczestnik najważniejszych europejskich programów t-j będzie jednym z beneficjentów, korzystających z poszerzonego obszaru badań i rozwoju technologicznego związanych z tymi programami.

Osobną wartością jest wplecenie polskiej nauki i rozwoju technologii związanych z przygotowaniem wdrożenia energetyki t-j **w europejskie programy i sieci**

wszelkstronnej współpracy w tym zakresie. Pozycja Polski w tych międzynarodowych strukturach będzie zależała od zaangażowanego potencjału i efektywności jego wykorzystywania dla osiągnięcia postępu w opracowaniu energetyki t-j. Ta pozycja naszego kraju będzie rzutowała na zakres sponsorowania naszych prac z centralnych funduszy europejskich przeznaczanych na rozwój badań i wdrożeń w zakresie energetyki t-j.

W krótszej perspektywie rozwój badań t-j będzie skutkował **wzbogaceniem krajowej infrastruktury badawczej** w nowoczesne urządzenia i aparaturę pomiarową przydatną także do badań i zastosowań technicznych w innych dziedzinach (dotyczy to w szczególności badań nad laserową syntezą t-j). Potencjał naukowy kraju będzie także wzrastał dzięki **rozwojowi kadry naukowej i technicznej**, której możliwości badawcze będą mogły być wykorzystywane na różne sposoby, także dla zwiększenia powiązania nauki polskiej z wielkimi programami europejskimi i światowymi. Temu rozwojowi sprzyjać będzie wymiana personelu naukowego, która jest jednym z podstawowych form współpracy europejskiej w ramach programów dotyczących badań w zakresie syntezy t-j.

Największe problemy są ze **zwiększeniem włączania się polskiego przemysłu** do przygotowywania infrastruktury i nowoczesnych technologii dla energetyki t-j. Ten dział gospodarki jest skutecznie opanowywany przez wiodące międzynarodowe i krajowe korporacje uzyskujące w wyniku tej aktywności duże korzyści ekonomiczne. Jak zaproponowano w pkt 4.4.1 proces włączania polskich firm do tworzenia infrastruktury i technologii dla badań i wdrażania energetyki t-j powinien być realizowany łącznie przez środowiska naukowe i gospodarcze w korelacji z programami i strukturami międzynarodowymi.

5. ZAKOŃCZENIE

W niniejszej Ekspertyzie wykazano potrzebę zintensyfikowania i optymalnego zorganizowania badań syntezy termojądrowej prowadzących do opracowania i wdrożenia energetyki termojądrowej. Dla pełniejszego zrozumienia podstaw naukowych i stanu ich poznania w skali światowej omówiono najważniejsze dwie opcje fizyczne realizacji efektywnej syntezy termojądrowej, to znaczy syntezy t-j z magnetycznym utrzymaniem plazmy DT (MCF) i z inercyjnym utrzymaniem plazmy DT z zastosowaniem laserów (IFE). Przedstawiono duży postęp jako ostatnio osiągnięto w tej dziedzinie w wyniku badań wykonywanych na wielkich instalacjach na całym świecie. W Europie fundamentalną rolę odgrywają wielkie programy ścisłej współpracy międzynarodowej skupiające i koordynujące wysiłki większości krajów członkowskich Unii Europejskiej. Najważniejsze są działania objęte Wspólnotą EURATOM w zakresie MCF i Projektem HiPER w zakresie IFE. Światowy program ITER, sponsorowany przez najważniejsze potęgi naukowe i ekonomiczne świata, dotyczy budowanego już we Francji wielkiego układu tokamakowego dla wykazania efektywności MCF. Opcja IFE będzie sprawdzana na kilku instalacjach laserowych projektowanych i budowanych w różnych miejscach na świecie – w Europie będzie to infrastruktura HiPER.

W jednym z najważniejszych obecnie obszarów rozwoju naukowego i technologicznego powiązanego z uzyskaniem w przyszłości unikalnego źródła energii bezpiecznej dla ludności i środowiska Polska powinna uczestniczyć w wymiarze odpowiadającym jej potencjałowi naukowemu i ekonomicznemu. Aktualnie w badania syntezy t-j są zaangażowane właściwie tylko zespoły w IFPiLM. Prace dotyczące technologii t-j są realizowane także w kilku innych ośrodkach w kraju. Także potencjał aparaturowy i środki finansowe wykorzystywane w kraju

dla realizacji projektów z tego zakresu są niewystarczające. Jedynie dzięki dorobkowi naukowemu i doświadczeniu badawczemu polskie zespoły są jeszcze traktowane partnersko w projektach międzynarodowych. Konieczna jest znaczne zwiększenie udziału Polski w programach termojądrowych wobec wzrastającego zakresy tych przedsięwzięć i wobec perspektyw powszechnego wykorzystywania ich rezultatów w niedalekiej przyszłości.

W niniejszej Ekspertyzie zaproponowano niezbędne działania dla osiągnięcia tego celu. Pokazano także konkretne korzyści wynikające z rozwoju badań termojądrowych nie tylko dla opracowania podstaw energetyki t-j, ale też dla dalszego postępu w różnych najnowszych kierunkach badań i zastosowań technologicznych. Wobec trendu światowego obejmującego zrównoważony rozwój obu opcji energetyki termojądrowej należy podobną strategię przyjąć w Polsce.