

PF-1000 – Specjalne Urządzenie Badawcze

Układ Plasma-Focus PF-1000 należy do klasy dynamicznych układów Z-pinch, które są samo-zaciskającymi się konfiguracjami plazma-pole magnetyczne. Przedrostek 'Z' w nazwie Z-pinch oznacza, że cylinder plazmowy zaciska się w kierunku osi 'z' pod wpływem pola magnetycznego indukowanego przez prąd elektryczny płynący wzdłuż tej osi. Ze względu na występowanie takich konfiguracji we Wszechświecie (kanały prądowe w skali galaktyki, rozbłyski na Słońcu), na Ziemi (np. zorza polarna, błyskawica, itp.) oraz ich znaczenie w różnego rodzaju zastosowaniach technicznych są one bardzo interesującymi obiektami fizyki plazmy.

W Plasma-Focus PF-1000 warstwa plazmowa powstaje w wyniku przebicia elektrycznego w gazie o niskim ciśnieniu zawartym między dwiema cylindrycznymi elektrodami. Siła elektrodynamiczna $\vec{j} \times \vec{B}$ (gdzie: \vec{j} – gęstość prądu płynącego w warstwie plazmowej, \vec{B} – pole magnetyczne wytworzone przez ten prąd) powoduje ruch plazmy w kierunku końca elektrod a następnie jej kolaps na osi układu elektrod. W wyniku powyższych procesów powstaje kolumna gęstej ($\sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) i gorącej ($T \sim 1 \text{ keV}$) plazmy utrzymywana przez pole magnetyczne przez kilkadziesiąt nanosekund. Plazma ta jest źródłem intensywnego promieniowania elektromagnetycznego (twarde i miękkie promieniowanie X), neutronowego (z reakcji D-D, w wypadku gdy gazem roboczym jest deuter), wiązek elektronów i jonów oraz intensywnych strumieni plazmy o prędkościach rzędu 10^7 cm/s .

Plazma wytwarzana za pomocą generatorów typu Plasma Focus była i jest od wielu lat obiektem intensywnych badań prowadzonych w szeregu krajów takich jak Stany Zjednoczone, Rosja, Włochy, Francja, Niemcy, Czechy i wielu innych, ponieważ:

- pozwala prowadzić badania podstawowe nieliniowych procesów towarzyszących przepływowi bardzo dużych prądów (do 3 MA) przez plazmę o gęstości 10^{18} - 10^{19} cm^{-3} , takich jak: niestabilności kinetyczne, niestabilności MHD, procesy filamentacji kanałów prądowych, tworzenie struktur bezsiłowych, itp. Procesy te mają uniwersalny charakter – podobne zjawiska obserwowane są we Wszechświecie (struktury włókniste, protuberancje) oraz na Ziemi (wyładowania atmosferyczne);

- w warunkach wysokiej temperaturze oraz gęstości plazmy wytwarzanej w układach typu PF zachodzą intensywne procesy fuzji lekkich jąder (reakcje typu D-D) i dlatego jest ona interesującym obiektem badań nad kontrolowaną fuzją termojądrową;

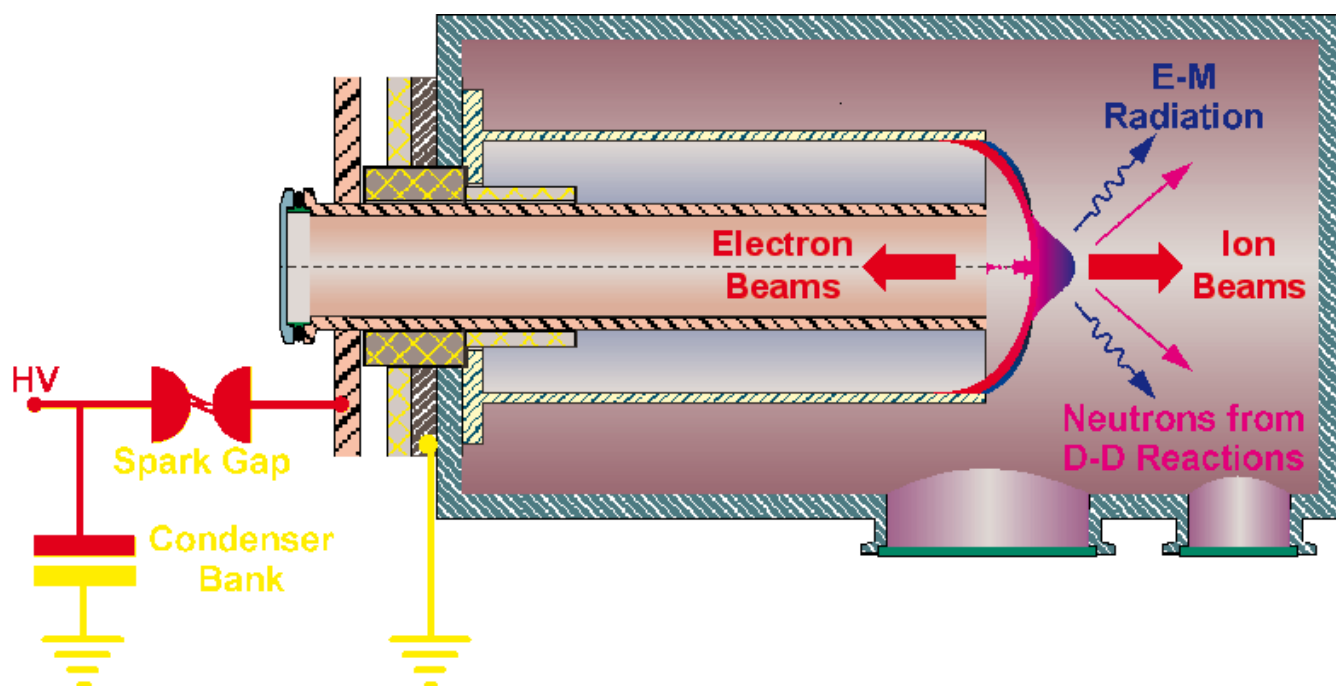
- generatory typu Plasma-Focus są nadal jednymi z najbardziej wydajnych, impulsowych źródeł neutronów ($\sim 10^{11}$ - 10^{12} neutronów na wyładowanie);

- intensywne strumienie plazmy oraz ukierunkowane wiązki wysokoenergetycznych jonów powstających w generatorach PF wykorzystywane są do testowania materiałów dla przyszłych reaktorów fuzyjnych;

- miniaturowe generatory typu Plasma-Focus, będące efektywnymi źródłami promieniowania X oraz neutronów prędkich mają szereg potencjalnych zastosowań takich jak: defektoskopia szybko poruszających się lub wirujących obiektów, zdalna detekcja niebezpiecznych materiałów, itp.

W skład PF-1000 jako stanowiska badawczego wchodzi trzy główne zespoły, a mianowicie:

- Bateria kondensatorów o łącznej pojemności 1,332 mF, składająca się z dwunastu modułów, z których każdy zawiera 24 niskiindukcyjne, wysokonapięciowe (50 kV) kondensatory o pojemności 4,625 mF każdy, połączone równolegle. W baterii kon-



Końcowa faza zjawiska PF



Fragment baterii PF-1000

densatorów układu PF-1000, przy napięciach ładowania w przedziale 20-40 kV, można zgromadzić energię elektryczną rzędu 266-1064 kJ, co pozwala komprimować plazmę (z prędkością ponad 100 km/s) polem magnetycznym towarzyszącym przepływowi prądu o natężeniu 2-3 MA. PF-1000 jest wyposażony w nowoczesny system automatycznego sterowania ładowaniem baterii sprzężony z układem kontroli jednoczesności zapłonu.

- Komora eksperymentalna o wymiarach (średnica = 1,4 m, długość = 2,5 m) wykonana ze stali nierdzewnej, połączona z kolektorem generatora prądowego i otaczająca cylindryczne, współosiowe elektrody układu. Zewnętrzna elektroda (katoda) składa się z 12 prętów wykonanych ze stali nierdzewnej, natomiast elektroda wewnętrzna (anoda) o średnicy 23 cm i długości 60 cm wykonana została z czystej miedzi. Elektrody rozdziela izolator wykonany z aluminy o długości 11,3 cm, obejmujący anodę. Próżnia w komorze wytwarzana jest za pomocą systemu nowoczesnych pomp turbomolekularnych.

- Zautomatyzowany system diagnostyk do pomiaru promieniowania emitowanego z plazmy i jej parametrów wraz z automatycznym systemem akwizycji danych, w skład którego wchodzi liczne diagnostyki służące do pomiarów parametrów plazmy oraz emitowanego z niej promieniowania. Większość z nich charakteryzuje się nanosekundową lub sub-nanosekundową zdolnością rozdzielczą.

W celu eliminacji silnych zakłóceń elektromagnetycznych sygnały z detektorów umieszczonych w mobilnych kłatkach Faradaya, (wyposażonych we własne, autonomiczne zasilanie) transmitowane są za pomocą linii światłowodowych do głównego układu kontroli i gromadzenia danych.

Poszczególne detektory, w zależności od wielkości fizycznych które umożliwiają zmierzyć, można pogrupować w sposób następujący:

- Zmieniające się w trakcie wyładowania widmo emitowanych neutronów mierzone jest metodą Time-of Flight za pomocą spektrometru składającego się z 8 mobilnych zestawów sond neutronowych (scyntylator-fotopowielacz-oscyloskop, FWHM ~ 2,5 ns) umieszczonych w pełni autonomicznych kłatkach Faradaya. System automatycznej akwizycji danych zbiera przebiegi rejestrowane przez sondy neutronowe rozmieszczone w różnych odległościach od źródła neutronów (kolumna plazmowa) wzdłuż osi układu oraz prostopadle do niej. Specjalny kod komputerowy wylicza na podstawie zarejestrowanych przebiegów widmo neu-



Zestaw pomiarowy z sondą scyntylacyjną typu BRAVO w mobilnej klatce

tronów $f(E,t)$. Każdy zestaw wyposażony jest w cylindryczny kolimator neutronów wypełniony węglikiem boru.

- Do badania subtelnej struktury emisji neutronowej wykorzystywana jest specjalna sonda składająca się z szybkiego scyntyлятора, układu Micro-channel-plate (MCP) oraz specjalnego oscyloskopu o pasmie przenoszenia 4 GHz. Zestaw ten zapewnia czasową rozdzielczość rejestracji impulsów (FWHM) < 0,8 ns.

- Całkowita emisja neutronów oraz jej anizotropia mierzona jest za pomocą zestawu pięciu aktywacyjnych liczników zawierających srebro, umieszczonych pod różnymi kątami względem osi układu a także liczników berylowego i itrowego reagujących natak zwane neutrony prędkie.

- W 2007 roku układ PF-1000 został dodatkowo wyposażony detektor germanowy HPGe do pomiaru promieniowania gamma z próbek aktywowanych neutronami emitowanymi z plazmy.

- Do rejestracji rozkładów gęstości plazmy wytwarzanej w PF-1000 służy zaprojektowany i wykonany przez pracowników IFPiLM, unikalny w skali światowej, 16-kadrowy interferometr laserowy (długość fali promieniowania lasera = 527,6 nm, czas trwania impulsu < 1ns, odstęp między kadrami na przemian 10 i 20 ns). Uzyskane interferogramy (16) obejmują przedział czasowy 220 nanosekund i po obróbce za pomocą specjalnego kodu komputerowego uzyskiwana jest sekwencja rozkładów gęstości plazmy, pozwalająca badać dynamikę plazmy w fazach tworzenia kolumny plazmowej, śledzić rozwój niestabilności magneto-hydrodynamicznych oraz proces końcowej dezintegracji struktur plazmowych w ramach jednego wyładowania.

- Czterokadrowa kamera oparta na wzmacniaczu obrazu typu MCP pozwala rejestrować rozkłady intensywności emisji miękkiego i twardego promieniowania X z plazmy. Czas trwania kadru jest krótszy niż 1ns, odstęp między kadrami regulowany w zakresie 0-20 ns.

- Do badań technologicznych procesów oddziaływania strumieni plazmy z powierzchniami różnych materiałów zbudowana została w 2013 roku specjalna kamera rejestrująca obrazy w szerokim zakresie promieniowania X charakteryzująca się podwyższoną czułością. Kamera wykorzystuje wzmacniacz obrazu MCP drugiej generacji współpracujący z odpowiednim ekranem luminescencyjnym. Czas ekspozycji regulowany w zakresie 10 ns – 1 μ s.

- Zestaw czterech diod typu PIN pozwala rejestrować świecenie plazmy w zakresie widzialnym oraz w zakresie miękkiego

promieniowania X w różnych miejscach kolumny plazmowe z rozdzielczością czasową ~ 1 ns. Przykrycie diod odpowiednio dobranymi filtrami pozwala rejestrować sygnały z różnych zakresów widmowych a co za tym idzie pomierzyć temperaturę plazmy.

– Układ Plasma Focus PF-1000 wyposażony jest w standardowy zestaw diagnostyk elektrycznych monitorujących działanie generatora prądu. W skład zestawu wchodzi: pasy Rogowskiego do pomiaru prądu, umieszczone w kolektorze i w komorze próżniowej w pobliżu katody, osiem sond magnetycznych do pomiaru pochodnej prądu umieszczone w kolektorze, opcjonalnie trzy sondy do pomiaru pola magnetycznego w przestrzeni między elektrodami oraz pojemnościowa sonda do pomiaru napięcia między elektrodami.

Plasma Focus PF-1000, ze względu na swoje parametry techniczne oraz nowoczesne wyposażenie diagnostyczne, jest urządzeniem unikatowym w skali światowej. Potwierdzeniem tej opinii jest udział laboratorium PF-1000, jako pierwszej polskiej infrastruktury badawczej, w programie „Transnational Access to Major European Infrastructures (FP6 – kontrakt nr RITA-CT-2006-26095, akronim MJPF-1000). W ramach tego programu Komisja Europejska sfinansowała koszt realizacji szesnastu (16) projektów badawczych zaproponowanych przez zespoły naukowców z sześciu państw (Anglii, Niemiec, Włoch, Rosji, Rep. Czeskiej oraz Estonii).

Znacznie wcześniej nim to nastąpiło, bo już pod koniec lat 90. ubiegłego wieku dzięki inicjatywie naukowców instytutu następowała integracja środowiska „focusowego”. Zainteresowane badaniami plazmowymi instytucje albo posiadały małe układy PF lub dzięki naszej pomocy naukowo-technicznej pobudowały urządzenia o energii baterii kilku kJ. Rozpoczęto wspólne badania mające na celu rozwój fizyki plazmy termojądrowej, w szczególności dla plazmy komprimowanej i utrzymywanej polem magnetycznym. Efektem tej współpracy było powołanie w 2001 roku **Międzynarodowego Centrum Gęstej Namagnetyzowanej Plazmy** (International Centre for Dense Magnetized Plasmas – **ICDMP**) – międzyinstytucjonalnej struktury działającej w IFPiLM. Działalność ICDMP wspierana jest przez Międzynarodową Radę Naukową, której członkowie nominowani zostali przez organizacje rządowe swoich krajów (Francji, Niemiec, Rosji, Włoch, Republiki Czeskiej, Bułgarii, Estonii, Indii, Singapuru oraz Malezji). Równoległe z powołaniem ICDMP utworzona została fundacja wspierająca działanie Centrum.

Fot. Archiwum IFPiLM



Międzynarodowa Rada Naukowa ICDMP, od lewej Ryszard Miklaszewski – Polska, Helmut Schmidt – Niemcy, Maurizio Samuelli – Włochy, Igor Garkusha – Ukraina, Marek Sadowski – Polska, Włodzimierz Surata – Polska, Alain Bernard – Francja, Ylo Ugaste – Estonia, Pavel Kubes – Czechy, Viaceslav Krauze – Rosja, Włodzimierz Stępniewski – Polska, Alexander Blagojev – Bułgaria, Alireza Talebitaher – Singapur, Karel Kolaczek – Czechy, Eric Lehner – USA, Marian Paduch – Polska

Instytut organizuje corocznie w ramach ICDMP specjalistyczny, dwudniowy „Workshop and Expert Meeting on Dense Magnetized Plasmas” oraz dwudniowe spotkanie Międzynarodowej Rady Naukowej ICDMP. Ostatni Workshop odbył się w dniach 6-7 września 2013, natomiast spotkanie Rady Naukowej ICDMP w dniach 8-9 września 2013 roku.

Należy stwierdzić, że decyzja o lokalizacji Międzynarodowego Centrum Gęstej Namagnetyzowanej Plazmy, poprzedzona licznymi konsultacjami z międzynarodowym środowiskiem naukowym, jak również decyzja o przyznaniu zespołowi skupionemu wokół tego urządzenia statusu Europejskiego Laboratorium w ramach kontraktu Transnational Access, są efektem między innymi wsparcia finansowego, jakie MNIŚW udzielało temu zespołowi pracującemu na układzie PF-1000 w postaci SPUB w poprzednich latach.

Główne eksperymenty w zakresie badań podstawowych prowadzonych w ramach ICDMP wykorzystują plazmę wytwarzaną w generatorze Plasma Focus PF-1000. Ponadto urządzenie służy do:

- Przygotowania i testowania aktywacyjnej diagnostyki neutronowej w ramach programu fuzji jądrowej Wspólnoty EURATOM (FP7), stosowanej w eksperymentach prowadzonych na tokamaku JET (Joint European Torus);
 - Opracowania nowych metod diagnostycznych związanych z rejestracją produktów reakcji fuzji jądrowej i promieniowania plazmy w korelacji z ewolucją i dynamiką plazmy;
 - Opracowania nowych technik diagnostycznych rejestracji ultraszybkich procesów.
 - Prowadzenia badań materiałowych dla potrzeb międzynarodowego projektu ITER oraz europejskiego projektu reaktora fuzyjnego DEMO (w ramach projektów EURATOM oraz IAEA CRP).
- Laboratorium PF-1000 było beneficjentem kolejnych Programów Ramowych Komisji Europejskiej: FP5 (INCO-COPERNICUS oraz Center of Excellence), FP6 (Transnational Access to Major European Infrastructures) oraz FP7 (EURATOM).

W Laboratorium PF-1000 zrealizowano 7 projektów Coordinated Research Projects (CRP) Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej (w planach są trzy kolejne), projekt IAEA Technical Cooperation oraz koordynowało międzynarodowy projekt NATO w ramach programu Science for Security

W ostatnich kilku latach międzynarodowy zespół naukowców skupiony wokół Plasma-Focus PF-1000 opublikował ponad 50

Fot. Archiwum IFPiLM



Zwierciadła wprowadzające impulsy laserowe w obszar plazmy



Dodatkowa bateria 2 MJ

artykułów w recenzowanych pismach naukowych znajdujących się na tzw. liście filadelfijskiej.

W 2012 roku, dwóch pracowników naukowych IFPiLM, członków zespołu PF-1000, uzyskało prestiżowe wyróżnienie: Nagrodę imienia I. V. Kurczatowa za osiągnięcia w badaniach pól magnetycznych w układach typu Plasma-Focus, przyznana przez Radę Naukową Narodowego Centrum Badawczego „Instytut im. Kurczatowa” (Troick).

Międzynarodowe sukcesy mobilizowały zespół PF-1000 do poszukiwania możliwości stopniowej modernizację aparatury diagnostycznej i samego urządzenia PF. Nastąpiło to roku 2012 dzięki Programowi NCBR „Badania i rozwój technologii dla kontrolowanej fuzji termojądrowej” w ramach strategicznego projektu badawczego „Technologie wspomagające rozwój bezpiecznej energetyki jądrowej”.

W ramach tego programu została przeprowadzona istotna modernizacja i przebudowa generatora plazmowego układu PF-1000 (DPF-1000U po modernizacji). Celem modernizacji i przebudowy układu PF-1000 było dostosowanie urządzenia do badań i wdrażania technologii termojądrowych. Modernizacja polegała na dołączeniu do kolektora urządzenia PF-1000 dodatkowej baterii (2 MJ). Umożliwia to uzyskanie impulsów prądowych składających się z dwóch składowych: szybkiej i wolnej (parametry pierwszej składowej: prąd kilka MA, czas trwania rzędu $10 \mu\text{s}$, parametry drugiej składowej: prąd około 400 kA, czas trwania rzędu ms). Dzięki temu powstała w procesie PF plazma



Elektrody układu PF – z systemem dynamicznego napełniania gas-puff



Śluza do wprowadzania próbek

możemy utrzymywać znacznie dłużej co przybliży nas do osiągnięcia parametrów plazmy powstającej w wyniku niestabilności w tokamakach.

Druga modernizacja polegała na zastosowaniu dwóch systemów „gas-puff” (poosiowy i przyizolatorowy). Pierwszy z nich (składający się z sześciu zaworów elektromagnetycznych) pozwala impulsowo wprowadzać strumień gazu w przestrzeń między-elektrodową, w okolicy izolatora. Umożliwia on prowadzenie badań przy niskim ciśnieniu gazu roboczego (deuteru) w komorze generatora, zapewniając właściwe warunki dla przebicia elektrycznego dzięki zwiększonemu lokalnie ciśnieniu w pobliżu izolatora. Drugi system, umieszczony wewnątrz elektrody centralnej, pozwala zwiększyć koncentrację strumienia plazmy wykorzystywanego do badań materiałowych. Pozwala to na modyfikację warunków gazowych (ciśnienie i rodzaj gazu) w przestrzeni wokół anody; dzięki temu można wpływać na rozkłady koncentracji plazmy i czas jej utrzymania. Jest to jedyne w świecie urządzenie PF mogące pracować w różnych warunkach koncentracji gazów roboczych i różnych czasów utrzymania plazmy.

Dodatkowo komora eksperymentalna została wyposażona w specjalną śluzę umożliwiającą wprowadzanie przed czoło elektrody różnego rodzaju tarcz, bez zapowietrzania komory.

Konstrukcja śluzy nie jest sprawą banalną gdyż jak wykazały wcześniejsze badania, umieszczanie w pobliżu anody, metalowych elementów mocujących tarcze, prostopadle do osi urządzenia plasma-focus ze względu na płynący przez nie prąd nastrocza poważne problemy ze stabilnością tarczy. Co prawda w trakcie oddziaływania strumieni (plazmy i wiązek jonowych) jest ona „nieruchoma” ale odbiega to od warunków występujących w oddziaływaniu plazma ścianka. Przyjęto więc, że elementy mocujące tarcze wprowadzane będą poprzez śluzę wzdłuż osi urządzenia naprzeciw elektrody wewnętrznej. Śluza zbudowana została z elementów próżniowych typu NW60: zaworu, trójnika, wysoko napięciowego elementu izolacyjnego i uchwyty mocującego pręt przesuwany. Cały zestaw próżniowy został zamocowany do okna komory (w tak zwanych wrotach) z możliwością wstępnego przesuwu góra-dół. Po zainstalowaniu badanej próbki w specjalnym uchwycie znajdującym się na końcu elementu izolacyjnego następuje odpompowanie śluzy. Po uzyskaniu odpowiedniego poziomu ciśnienia gazu w śluzie zamykany jest zawór od strony układu pompowego i otwierany jest zawór od strony komory. Ponieważ objętość śluzy jest znacznie mniejsza od objętości komory urządzenia DPF-1000U (ponad tysiąc

razy) wystarczy uzyskać ciśnienie rzędu 10^{-3} mbar. W tym momencie możemy umieścić próbkę w obszar oddziaływania strumieni plazmowych. Pręt przesuwany (o średnicy 25 mm) z próbką w uchwycie izolacyjnym wsuwany jest poprzez teleskopową podporę umieszczoną w połowie odległości pomiędzy czołem elektrody centralnej PF a ścianą komory eksperymentalnej.

Zbudowany system służy pozwala na wprowadzanie tarcz bez zapowietrzania komory próbek o wymiarach poprzecznych mniejszych niż 30x30 mm co jest zupełnie wystarczające do realizacji zadań związanych z badaniem oddziaływań plazma-tarcza. Dodatkowo zaprojektowana ciągnio ułatwiająca wyciąganie próbki po eksperymencie.

Opisane wcześniej modernizacje zwiększyły atrakcyjność układu PF-1000 zarówno dla naukowców zajmujących się badaniami podstawowymi jak i tych których interesują oddziaływanie plazma-tarcza i badaniami materiałowymi. Zwiększyło się więc wykorzystania z urządzenia przez inne jednostki naukowe.

Korzystanie z urządzenia PF-1000 przez krajowe i międzynarodowe zespoły naukowe odbywa się na podstawie regulaminu korzystania z unikatowego kompleksu badawczego Plasma-Focus PF-1000 oraz na podstawie kontraktów na wykonanie określonych badań naukowych podpisywanych z różnymi organizacjami. W ramach każdej z tych umów definiowany jest zakres wykorzystania urządzenia. Podstawowe umowy to:

- Kontrakt Asocjacyjny ze Wspólnotą Euratom reprezentowaną przez Komisję Europejską.
- Program NCBR „Badania i rozwój technologii dla kontrolowanej fuzji termojądrowej” w ramach strategicznego projektu badawczego „Technologie wspomagające rozwój bezpiecznej energetyki jądrowej”.
- Projekty Coordinated Research Projects (CRP) Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej.
- Umowy o współpracy podpisane na szczeblu instytutów i uczelni, np. umowa pomiędzy IFPiLM z NCBJ, Uniwersytetem Sofijskim, Baikov Institute of Metallurgy and Material Science.
- Umowy o współpracy międzynarodowej podpisane na szczeblu rządowym, np. umowa pomiędzy Rosją i Polską.



Widok komory eksperymentalnej

Fot. Archiwum IFPiLM

Dzięki tym umowom i Międzynarodowemu Centrum Gęstej Namagnetyzowanej Plazmy wspieranego przez fundację działającą pod auspicjami UNESCO urządzenie PF-1000 było i jest wykorzystywane do badań przez naukowców z wielu ośrodków krajowych oraz zagranicznych:

- Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Świerk
- Instytut Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie
- Wydział Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej
- Wydział Chemii, Uniwersytet im. Mikołaja Kopernika w Toruniu
- Czech Technical University, Praga
- Institute of Plasma Physics, CAS, Praga
- Institute of Physics, CAS, Praga
- National Research Centre „Kurchatov Institute”, Troick, Rosja
- SRC RF TRINITI, Troick, Rosja
- Baikov Institute of Metallurgy and Material Sciences, Moskwa
- University of Sofia, Sofia
- The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics (ICTP), Trieste, Italy
- A.A. Baikov Institute of Metallurgy and Material Science (IMET), Russian Academy of Sciences, Moskwa, Rosja
- The Moscow Physical Society (MPS), Moskwa, Rosja
- FZJ, Juelich, Niemcy
- D.V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus (IEPA), Sankt-Petersburg, Rosja
- Tallinn University (TU), Talin, Estonia



Polsko-Czeski zespół eksperymentalny od lewej stoją Andrzej Szymaszek – Polska, Maryna Cernyshova – Polska, Zofia Kalinowska – Polska, Lesław Karpiński – Polska, Ewa Zielińska – Polska, Ryszard Panfil – Polska, Jozef Kravarik – Czechy, Irena Ivanova-Stanik – Polska, Sławomir Głowacki – Polska, Studenci z Czech (3), Poniżej Pavel Kubes – Czechy, Marek Sholz – Polska, Szymon Zajac – Polska, Student z Czech, siedzi Marian Paduch – Polska

Fot. Archiwum IFPiLM

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

- Program realizowany w ramach Międzynarodowego Centrum Gęstej Namagnetyzowanej Plazmy wspierany przez fundację działającą pod auspicjami UNESCO;
- Program fuzji jądrowej Wspólnoty Euratom na podstawie kontraktu zawartego z Komisją Europejską (reprezentującą Wspólnotę Euratom); Contract of Association Euratom-IPPLM Nr FU07-CT-2007-00061;
- Umowa o współpracy w zakresie rozwoju diagnostyk dla stelleratora W7-X pt. Neutron diagnostics for W7-X, zawartej z Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Greifswald, Germany;
- Programy Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej (IAEA).

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 realizowane są badania w ramach projektu NCBR, w którym udział biorą, oprócz Instytutu Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy, Instytut Fizyki Jądrowej w Krakowie, Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Politechnika Warszawska, AGH i firma ACS.

W ostatnich latach we wspólnych eksperymentach prowadzonych z wykorzystaniem generatora PF-1000 udział brali:

- ♦ Siedmioosobowy zespół pracowników naukowych i doktorantów Politechniki Praskiej (2 x 2 tygodnie co roku) – zespół realizuje programy naukowe w ramach Międzynarodowego Centrum Gęstej Namagnesowanej Plazmy;
- ♦ Pracownicy naukowcy z National Research Centre „Kurchatov Institute”, Troick z zespołem IFPiLM (3x1 tydzień) prowadzili badania rozkładów pól magnetycznych w obszarze pinchu (faza kolapsu) w ramach Międzynarodowego Centrum Gęstej Namagnesowanej Plazmy;
- ♦ Mieszany zespół pracowników naukowych Wydziału Chemii UMK (Toruń) wspólnie z pracownikami Zakładu Fizyki Detektorów NCBJ (Świerk) – (2 x 1 tydzień) prowadził badania w ramach programu EFDA (EURATOM) – dodatkowo IFPiLM kontynuował prace na zlecenie zespołu przez 3 tygodnie;
- ♦ Zespół pracowników Zakładu Fizyki Plazmy NCBJ (Świerk) (3 x 1 tydzień co roku) – prowadził badania spektroskopowe i jonowe w ramach programu EFDA (EURATOM), IAEA CRP oraz NCBR;
- ♦ Zespół Wydziału Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej (2 x 1 tydzień) prowadził naświetlanie próbek materiałów w ramach programu EFDA (EURATOM i NCBR);
- ♦ Na zlecenie Zakładu Transportu Neutronów (IFJ PAN, Kraków) testowano w ramach programu EFDA (EURATOM) neutronowe liczniki berylowe (2 x 1 tydzień);
- ♦ Naukowcy z Uniwersytetu Sofijskiego wraz zespołem IFPiLM (2 tygodnie) prowadził badania spektroskopowe plazmy w ramach Międzynarodowego Centrum Gęstej Namagnesowanej Plazmy;
- ♦ Międzynarodowy zespół (ICTP – Włochy, IMET, MPS, NRC ‘Kurchatov Institute’, IEPA, SRC RF TRINITY – Rosja, FZJ – Niemcy, Tallinn University (TU) – Estonia oraz Politechnika Warszawska, NCBJ – Otwock-Świerk) badał możli-

wości modyfikacji własności różnego rodzaju materiałów pod wpływem strumieni gorącej plazmy i szybkich strumieni jonów.

Dwóch studentów Wydziału Elektroniki i Techniki Informatycznych Politechniki Warszawskiej oraz jeden student Wydziału Inżynierii Materiałowej PW uczestniczyło w eksperymentach w ramach przygotowywania prac magisterskich.

Prowadzone badania mają głównie charakter poznawczy. Wykorzystując wieloletnie doświadczenie zespołów zdobyte w trakcie prowadzenia badań podstawowych Instytut prowadzi także badania aplikacyjne w obszarze detekcji niebezpiecznych materiałów, radiografii i defektoskopii oraz rejestracji ultraszybkich procesów. Zespoły badawcze IFPiLM związane z PF-1000 zaangażowane są między innymi w budowę kompletnych zestawów diagnostycznych dla potrzeb wielkich europejskich infrastruktur badawczych, takich jak Joint European Torus (spektroskopia rentgenowska i VUV, a także neutronowa diagnostyka aktywacyjna), Wendelstein 7-X (spektroskopia rentgenowska), ITER (Radial Neutron Camera).

Przedstawione zostało dotychczasowe wykorzystanie urządzenia w badaniach naukowych i pracach rozwojowych nie zamierzamy na tym poprzestać. W kolejnych latach przewidujemy realizację następujących badań naukowych wykorzystujących urządzenie PF-1000:

- Badanie aktywacji neutronami o energiach 2.45 MeV różnych izotopów pierwiastków w celu zastosowania ich do pomiarów neutronowych na JET (Joint European Torus) oraz w ramach programu fuzji jądrowej Wspólnoty EURATOM (Horizont 2020).
- Badanie elementów aktywacyjnej diagnostyki neutronowej dla W7-X, w ramach umowy z Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Greifswald.
- Badanie emisji produktów syntezy jąder deuteru z wysokotemperaturowej plazmy generowanej w układzie PF-1000. Celem programu jest uzyskanie maksymalnej emisji neutronów z układu typu Plasma-Focus przy danym prądzie płynącym przez plazmę, zbadanie mechanizmów tej emisji oraz określenie metodą TOF widma energetycznego promieniowania neutronowego emitowanego z gorącej plazmy. Program realizowany będzie w ramach Międzynarodowego Centrum Gęstej Namagnetyzowanej Plazmy.
- Badanie wpływu dodatkowej iniekcji deuteru na dynamikę powłoki plazmowej, efektywność generacji strumieni plazmy oraz emisji neutronowej.
- Badanie oddziaływania intensywnych strumieni wysokotemperaturowej plazmy z różnego rodzaju materiałami, np. specjalnymi stalami nisko-aktywacyjnymi, materiałami kompozytowymi, materiałami na pokrycia satków kosmicznych, itp. (prace w ramach programów IAEA, Konsorcjum EUROFusio oraz umów bilateralnych).
- Testowanie nowego rodzaju detektorów neutronowych (radiator + Open MCP), w ramach europejskiego programu fuzji termojądrowej koordynowanego przez Konsorcjum EURO-Fusion.

Aby efektywnie realizować te plany potrzebny jest dalszy rozwój zainstalowanych diagnostyk, budowa nowych i modernizacja układu PF-1000, myślimy o zainstalowaniu zewnętrznych pól magnetycznych i elektrycznych umożliwiających kierowanie powstających strumieni plazmy. Na to wszystko potrzebne są pieniądze, ale powstała infrastruktura pozostanie w kraju, a rezultaty badań są nie do przecenienia.

Marian Paduch