

BADANIA TERMOJĄDROWE W POLSCE: CZEŚĆ 2

Thermonuclear Research in Poland: part 2

Monika Kubkowska, Andrzej Gałkowski

Streszczenie: Artykuł przedstawia przegląd badań w dziedzinie fuzji jądrowej, prowadzonych przez polskie jednostki naukowe. W szczególności opisane są zadania realizowane przez Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy, będący koordynatorem badań i reprezentantem Polski w konsorcjum EUROfusion. Prace dotyczą zarówno prac doświadczalnych i udziału polskich naukowców w eksperymentach na układach typu tokamak czy stellarator, jak i modelowania zjawisk zachodzących w plazmie. Ponadto przedstawiono zaangażowanie w programie EUROfusion jednostek naukowych tworzących Centrum naukowo-przemysłowe Nowe Technologie Energetyczne (CeNTE). Zadania te dotyczą głównie fuzji z magnetycznym utrzymaniem, ale dotyczą także wsparcia naukowców od strony informatycznej, jak również badań socjo-ekonomicznych.

Abstract: The article presents an overview of research performed by Polish research units in the field of nuclear fusion. In particular, the tasks carried out by the Institute of Plasma Physics and Laser Microfusion, as the coordinator and Polish representative in the EUROfusion consortium, are described both in the part related to the magnetic and laser plasma confinement. The work covers experimental research and the participation of Polish scientists in experiments on tokamak or stellarator systems as well as modelling of plasma phenomena. Moreover, the involvement of the members of the Centre New Energy Technologies performing the EUROfusion tasks was presented. These tasks are mainly related to the magnetic fusion part but also are to support scientists from the IT side as well as socio-economic studies.

Słowa kluczowe: fuzja jądrowa, fizyka plazmy, energetyka termojądrowa, W7-X, JET, ITER, CeNTE

Keywords: nuclear fusion, plasma physics, thermonuclear energy, W7-X, JET, ITER, CeNTE

Wstęp

Fuzja jądrowa może, w przyszłości, przyczynić się do zaspokojenia rosnącego zapotrzebowania na energię, w sposób zrównoważony, bezpieczny i przyjazny dla środowiska. Program badań nad energetyką termojądrową realizowany jest w Europie i na całym świecie od wielu dekad. Obecnie najistotniejszy tego typu projekt związany jest z budową największego dotychczas eksperymentalnego reaktora opartego na fuzji, reaktora ITER (z łac. droga), którego celem jest zademonstrowanie syntezy jądrowej jako realnego i zrównoważonego źródła energii. Projekt jest przedsięwzięciem międzynarodowym; poza Unią Europejską zaangażowane są także Japonia, Stany Zjednoczone, Rosja, Chiny, Korea Południowa i Indie. Polskie jednostki prowadzą badania naukowe i technologiczne w ramach europejskiego programu fuzji termojądrowej Wspólnoty EURATOM. Koordynatorem jest europejskie Konsorcjum EUROfusion [www.euro-fusion.org]. Polska reprezentowana jest w Konsorcjum przez Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy (IFPiLM), który koordynuje prace krajowe w ramach Centrum naukowo-przemysłowego Nowe Technologie Energetyczne (CeNTE) [www.cente.ifpilm.pl]. Centrum skupia potencjał badawczy z 17 instytucji naukowo-badawczych w kraju (stan na listopad 2020 r.).

Program EUROfusion ma dwa główne cele, zdefiniowane jako:

- przygotowanie eksperymentów i opracowanie scenariuszy pracy dla budowanego obecnie w Cadarache we Francji międzynarodowego reaktora ITER, oraz
- opracowanie koncepcji przyszłej demonstracyjnej elektrowni termojądrowej DEMO.

Ważnym aspektem programu EUROfusion jest także wspieranie kształcenia i szkolenia młodej kadry, za pośrednictwem programów badawczych i grantów inżynierskich.

Z drugiej strony działa w Europie agencja Fusion for Energy (F4E, <https://f4e.europa.eu>), której zadaniem jest wniesienie wkładu Wspólnoty EURATOM do Międzynarodowej Organizacji Energii Termojądrowej (ITER IO). Agencja F4E finansuje i organizuje udział Wspólnoty EURATOM we wspólnym, europejsko-japońskim przedsięwzięciu na rzecz rozwoju energetyki termojądrowej. Przedsięwzięcie jest znane pod nazwą Broader Approach i realizowane jest na terenie Japonii jako uzupełnienie projektu ITER. Ponadto agencja F4E uczestniczy w przygotowaniu i koordynacji działań mających na celu opracowanie koncepcji budowy demonstracyjnego reaktora termojądrowego DEMO, a także koncepcji powiązanych obiektów, w tym urzą-

dzenia IFMIF (z ang. International Fusion Materials Irradiation Facility).

Europejskie konsorcjum EUROfusion opracowało (stale aktualizowaną) mapę drogową fuzji jądrowej, w której zdefiniowane zostały tzw. misje mające doprowadzić do uzyskania energii elektrycznej z fuzji. W pracach związanych z misjami Mapy Drogowej Fuzji Jądrowej (MDFJ) mają swój udział naukowcy z Polski. Prace realizowane przez polskie jednostki naukowe dotyczą m.in. udziału w eksperymentach na działających urządzeniach fuzyjnych (JET, ASDEX Upgrade, W7-X itp.), rozwoju diagnostyk plazmy i produktów fuzji jądrowej, jak również modelowania i symulacji zjawisk zachodzących w plazmie.

Udział Instytutu Fizyki Plazmy i Laserowej Mikro-syntezy

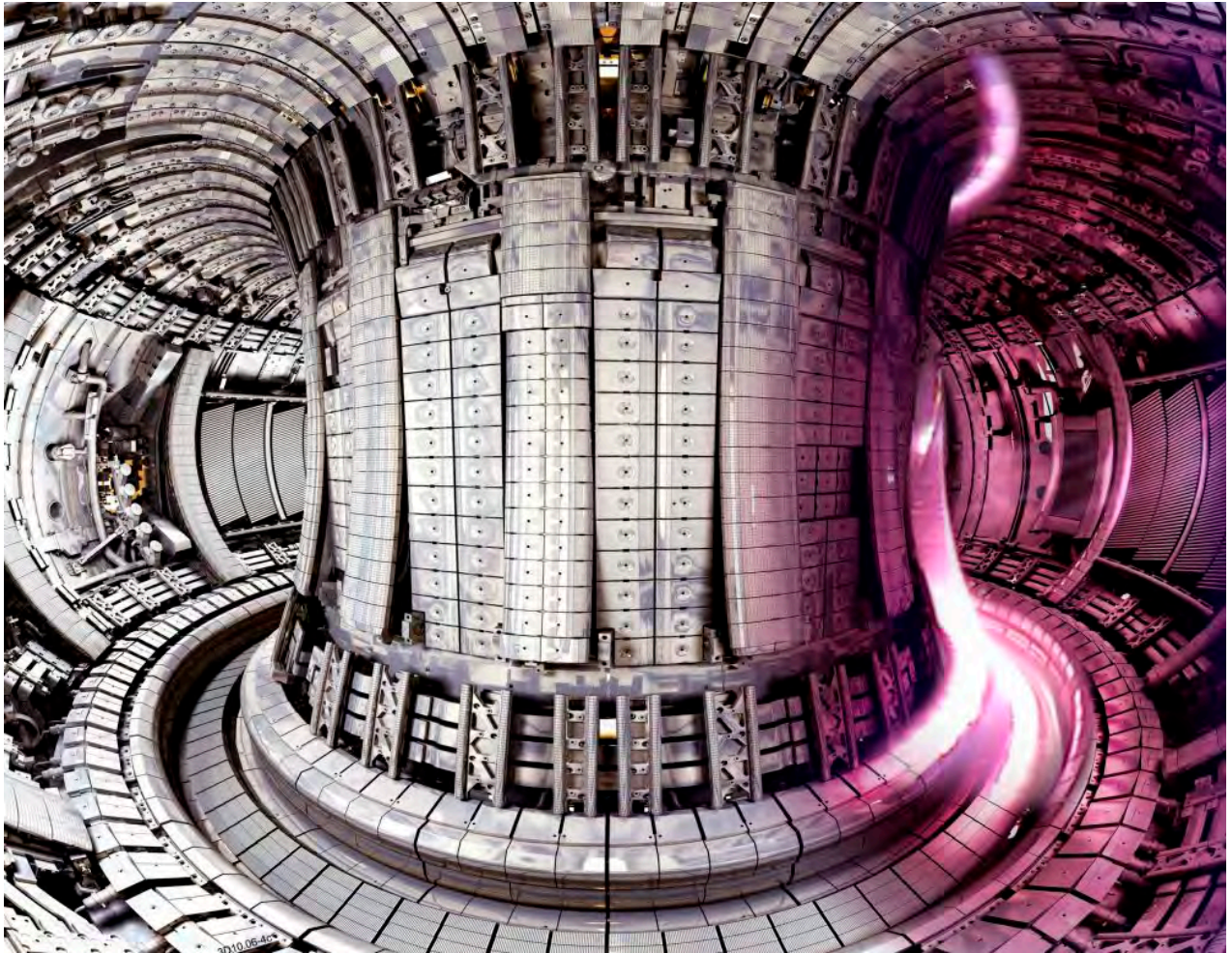
Powstanie, w roku 2005, polskiej Asocjacji EURATOM-IFPILM (związane z wejściem Polski rok wcześniej do Wspólnoty EURATOM) otworzyło przed naukowcami z kraju możliwości rozwijania kompetencji w dziedzinie badań nad syntezą termojądrową. Udział w międzynarodowych eksperymentach pozwolił zdobyć doświadczenie, a także poznać możliwości oraz potrzeby prowadzonych badań.

Celem badań, prowadzonych obecnie na największym działającym obecnie tokamaku na świecie, tokamaku JET, jest opracowanie scenariuszy operacyjnych na rzecz przyszłej kampanii deuterowo-trytowej (DT). W szczególności ma to służyć optymalizacji działania urządzeń termojądrowych kolejnej generacji, takich jak ITER — eksperymentalny reaktor budowany w Cadarache we Francji, czy DEMO — pierwsza prototypowa elektrownia termojądrowa. Oszacowania prowadzone dla tokamaka ITER pokazują, że bilans energetycznego zysku z fuzji powinien być na poziomie $Q \geq 10$ (przy 50 MW dostarczonej mocy, wytworzona zostanie moc na poziomie 500 MW w wyładowaniu trwającym 400-600 s). Znaczna część czasu eksperymentalnego w JET poświęcona jest na przygotowanie scenariusza podstawowego (ang. baseline scenario) oraz scenariusza hybrydowego (ang. hybrid scenario), w celu uzyskania podczas kampanii DT 10-15 MW mocy z fuzji w stanie stacjonarnym trwającym ok. 5 s. Scenariusze opracowane w JET mają być kompatybilne z materiałami pierwszej ściany w reaktorze ITER. Ściana wewnętrzna tokamaka JET pokryta jest berylem, a dywertor wykonany jest z wolframu; są to te same materiały, jakie przewidziane są dla ITER-a. Głównym wyzwaniem jest w związku z tym zapewnienie stabilności wyładowania plazmy, w tym dobrego utrzymania plazmy przy zastosowaniu pełnej mocy dodatkowego grzania i ograniczeniach wynikających z użycia dywertora wolframowego. Wolfram jest pier-

wiastkiem o dużej liczbie atomowej $Z (=74)$, powoduje więc straty radiacyjne w plazmie, a tym samym jej wychładzanie. Akumulacja zanieczyszczeń (w tym wolframu) może prowadzić do słabego utrzymania plazmy, a nawet do zerwania sznura plazmowego. W związku z powyższym kontrola zachowania wolframu (i innych zanieczyszczeń) w plazmie oraz opracowanie zintegrowanych metod do utrzymania koncentracji domieszek na niskim poziomie ma ogromne znaczenie dla osiągnięcia wysokiej wydajności energetycznej syntezy termojądrowej.

Naukowcy z Polski od lat prowadzą prace związane z badaniem zachowania zanieczyszczeń w plazmie, na tokamaku JET i na mniejszych urządzeniach, poprzez analizy danych ze spektrometrów promieniowania ultrafioletowego oraz miękkiego promieniowania rentgenowskiego. Na podstawie linii widmowych wyznaczana jest koncentracja metalicznych domieszek, takich jak wolfram, nikiel, żelazo, miedź czy molibden. Z kolei analiza sygnałów z kamer miękkiego promieniowania rentgenowskiego umożliwia wyznaczenie profili koncentracji zanieczyszczeń oraz uzyskanie dwuwymiarowych rekonstrukcji mocy promieniowania z plazmy.

W celu kontroli gęstości plazmy stosuje się, między innymi, wstrzykiwanie do komory próżniowej zamrożonych granulek, tzw. pelletów, wykonanych z wodoru lub jego izotopów. Pellety mogą być również wykorzystywane do zwiększenia częstotliwości lokalnych modów brzegowych, tzw. ELM-ów (z ang. edge localized modes). W dzisiejszych urządzeniach z metalicznymi elementami wewnętrznymi wymagana jest duża częstotliwość ELM-ów po to, aby wzmocnić usuwanie zanieczyszczeń z plazmy, a tym samym zapobiec ich akumulacji. Tym tematem zajmują się również naukowcy z IFPILM, a wyniki ich badań służą następnie do walidacji kodów numerycznych służących do modelowania plazmy brzegowej, co wspomaga planowanie wyładowań plazmy i przygotowanie JET-a do kampanii deuterowo-trytowej. Do symulacji numerycznych wykorzystywany jest nieliniowy trójwymiarowy kod magnetohydrodynamiczny (MHD). Celem jest zidentyfikowanie najbardziej niestabilnych modów MHD, prowadzących do generacji i ewolucji ELMów. Ma to znaczenie dla kontroli i minimalizacji strumieni ciepła wydzielanych podczas takich niestabilności, co jest kluczowe dla pracy urządzeń fuzyjnych. Warto dodać, że eksperymenty prowadzone na średnich tokamakach, takich jak ASDEX-Upgrade (Garching, Niemcy), czy TCV (Lozanna, Szwajcaria), mają również ogromne znaczenie dla badań fuzyjnych i stanowią uzupełnienie badań prowadzonych na tokamaku JET. Urządzenia te mają unikalne możliwości eksperymentalne; celem prowadzonych badań jest



Fot.1. Wnętrze tokamaka JET z widoczną po prawej stronie plazmą (fot. CCFE, JET)
Photo 1. Tokamak JET inside with visible plasma on the right (Photo: CCFE, JET)

zapewnienie efektywnego wykorzystania doświadczeń i ekstrapolacja wyników do przyszłych urządzeń termojądrowych, takich jak ITER czy DEMO. Prowadzone badania obejmują warunki i reżimy, w których średniej wielkości tokamaki mają wyjątkowe możliwości eksperymentalne.

Prace dotyczące analiz danych eksperymentalnych, kalibracji i opracowania nowych diagnostyk oraz modelowania plazmy są głównymi tematami podejmowanymi przez polskie zespoły. Przeprowadzone obliczenia numeryczne umożliwiają weryfikację poprawności modeli transportu plazmy zastosowanych w symulacjach oraz umożliwiają określenie wpływu domieszkowania na parametry plazmy. Naukowcy z IFPiLM od lat uczestniczą w pracach związanych z symulacją różnych scenariuszy plazmy w kontekście reaktorów ITER i DEMO. Do otwartych kwestii należy wciąż zagadnienie dopuszczalnego strumienia mocy docierającej do płyty dywertora. Głównym kandydatem na materiał, z którego byłaby zbudowana płyta dywertora jest wolfram, który będzie zastosowany

w ITERze. Wynika to głównie z wysokiej temperatury topnienia tego metalu oraz jego zdolności do tworzenia związków z pierwiastkami wchodzącymi w skład plazmy. Obecnie prowadzone są również badania nad zastosowaniem ciekłych metali jako materiału pokrywającego płytę dywertora. W tym wypadku rozważa się użycie litu, cyny lub stopu litu z cyną. W ostatnich latach w IFPiLM został rozwinięty numeryczny model ciekłego dywertora. Modelowanie reaktora DEMO z dywertorem pokrytym warstwą ciekłego litu wykazało redukcję mocy do płyty dywertora poprzez rozcieńczenie paliwa jądrowej w rdzeniu przez jony litu, a następnie poprzez rozproszenie części energii na skutek promieniowania w warstwie brzegowej. Redukcja mocy docierającej do dywertora przekłada się jednak na zmniejszenie (nawet trzykrotne) mocy reaktora w porównaniu do przewidywań dla reaktora z dywertorem wolframowym. W związku z tym prowadzone są prace nad domieszkowaniem plazmy np. kryptonem, co, jak pokazują wyniki symulacji, może mieć korzystny wpływ na pracę reaktora z ciekłym dywertorem.

Naukowcy z IFPiLM we współpracy z IFJ PAN mają swój udział w kalibracji diagnostyk neutronowych tokamaka JET, wykonanej za pomocą generatora neutronów o energii 14 MeV, której celem było wyznaczenie współczynników kalibracyjnych dla komór rozszczepieniowych oraz współczynników aktywacyjnych dla aluminium, oraz niobu. Uzyskane wyniki zostaną zweryfikowane podczas kampanii deuterowo-trytowej. Naukowcy z IFPiLM rozwijają również metodę aktywacyjną, która stosowana jest do charakterystyki różnych źródeł neutronów, w tym właśnie do generatora neutronów o energii 14 MeV użytego na JET. Polega ona na przygotowaniu odpowiednich kapsuł zawierających folie wykonane z różnych materiałów, które po umieszczeniu blisko źródła neutronów ulegają napromienieniu. Następnie mierzone jest promieniowanie aktywowanych próbek, które, w połączeniu z obliczeniami numerycznymi, świadczy o wydajności emisji neutronów.

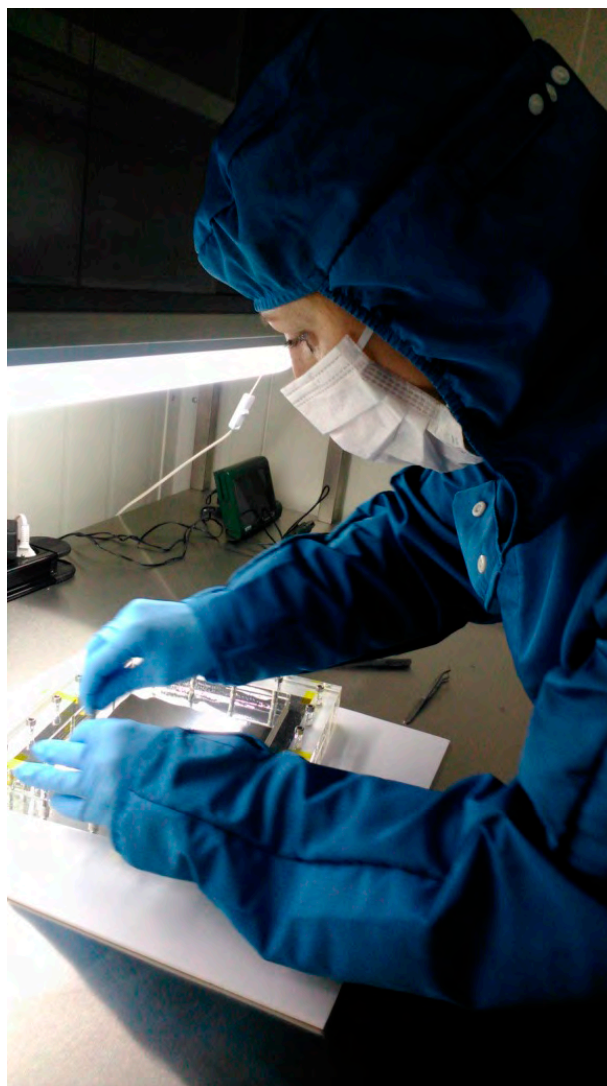
Poprzez uczestnictwo w projekcie W7-X polscy naukowcy stali się częścią międzynarodowej społeczności stellaratorowej, dzięki której zdobywają wiedzę i doświadczenie. Koncepcja stellaratora jako reaktora termojądrowego wciąż pozostaje do rozważenia, a kolejne kampanie eksperymentalne na W7-X służą optymalizacji pracy tego urządzenia.

Poza udziałem w badaniach na europejskich urządzeniach naukowcy z IFPiLM biorą czynny udział w kampanii eksperymentalnej na stellaratorze LHD (Large Helical Device) znajdującym się w Narodowym Instytucie Badań Termojądrowych (National Institute for Fusion Studies – NIFS) w Japonii. Jest to drugie po W7-X urządzenie wykorzystujące cewki nadprzewodnikowe, w tym wypadku w konfiguracji heliotronowej pola magnetycznego, odmiennej od konfiguracji pola magnetycznego w W7-X. Udział polskich naukowców związany jest z badaniem zachowania zanieczyszczeń plazmy (specjalnie wstrzykiwanych) w różnych warunkach eksperymentalnych.

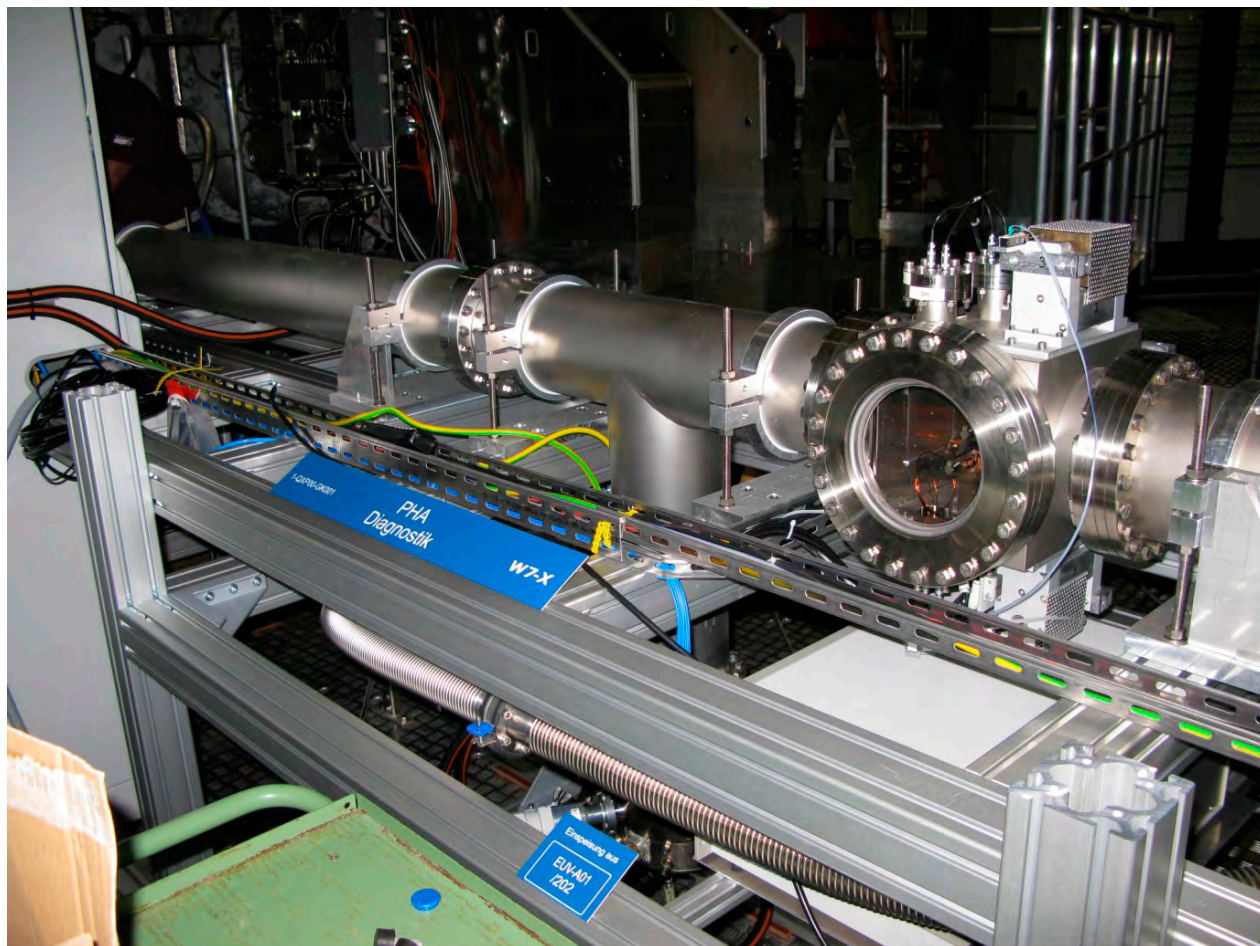
Innym urządzeniem, w którego prace zaangażowani są pracownicy IFPiLM, jest japoński tokamak JT-60SA z cewkami nadprzewodnikowymi. Program badań na JT-60SA ma za zadanie uzupełnić w sposób komplementarny program badawczy tokamaka ITER. Tokamak JT-60SA będzie oddany do użytku wcześniej niż ITER, co pomoże w rozstrzygnięciu kilku kwestii techniczno-projektowych ITERa. Projekt powstający we współpracy Japonii i Unii Europejskiej jest obecnie na etapie finalizowania i sprawdzania podsystemów. Konstrukcja została zakończona w 2020 r., a wkrótce oczekiwana jest pierwsza plazma. Udział IFPiLM w tym programie polega na analizie różnych scenariuszy pracy JT-60SA poprzez przeprowadzenie symula-

cji numerycznych dostarczających informacji o mocy całkowitego promieniowania w centrum plazmy, jak również o mocy docierającej do dywertora przy różnym domieszkowaniu – w tym przypadku rozważany jest zarówno dywertor węglowy, jak i wolframowy. Od dwóch lat grupa naukowców z Polski ma również swój udział w opracowaniu spektrometru promieniowania ultrafioletowego dla dywertora tokamaka JT-60SA. Zadania dotyczą przygotowania generalnej koncepcji spektrometru, jak również szczegółów dotyczących wyboru systemu pompującego dla uzyskania odpowiedniej próżni w komorze spektrometru oraz doborze odpowiedniego detektora.

W badaniach nad rozwojem energetyki termojądrowej istotnym tematem są również oddziaływania plazmy z elementami wewnętrznymi komory reaktora. Warstwa kodepozytu gromadzącego się na powierzchni ścianek zawiera materiał odparowa-

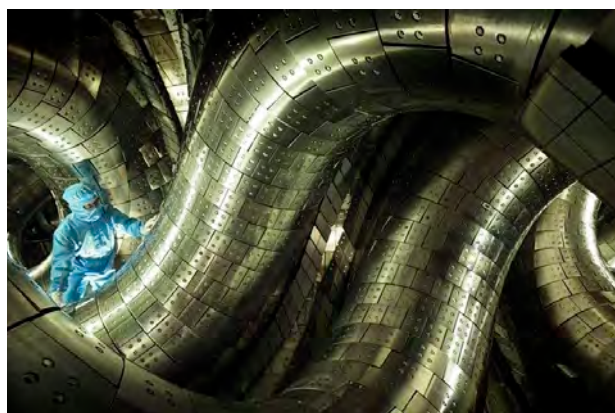


Fot.2. Montaż GEM (fot. IPFiLM)
Photo 2. GEM assembly



Fot.3. Komora PHA
Photo 3. PHA chamber

ny z elementów wewnętrznych urządzenia w czasie wyładowań plazmowych, osadzony wtórnie w różnych miejscach komory. W skład tej warstwy, oprócz podstawowego materiału ścianek komory plazmowej (węgiel, wolfram lub beryl), wchodzi domieszki (zanieczyszczenia) innych materiałów pochodzących z elementów układów pomiarowych np. z anten dostarczających wiązkę mikrofal do dodatkowego grzania plazmy. Warstwa kodepozytu zawiera



Fot.4. Wnętrze stellaratora LHD, NIFS
Photo 4. Stellarator LHD inside, NIFS

też zabsorbowane paliwo termojądrowe — deuter czy w przyszłości mieszaninę deuteru i trytu. Izotopy wodoru nie mogą gromadzić się w warstwie kodepozytu nieograniczenie; powinny być monitorowane oraz usuwane. IFPiLM od lat uczestniczy w pracach mających na celu opracowanie diagnostyki do badania retencji izotopów wodoru oraz depozycji materiałów na wewnętrznej powierzchni reaktorów termojądrowych. Jedną z proponowanych metod jest metoda analizy chemicznej z wykorzystaniem laserowej spektroskopii wzbudzeniowej LIBS (z ang. *Laser-Induced Breakdown Spectroscopy*). W 2019 r. na tokamaku FTU (Frascati Tokamak Upgrade) zlokalizowanym we Włoszech przeprowadzono eksperyment demonstrujący wykorzystanie metody LIBS w wariacie dwuimpulsowym.

Badania nad energetyką termojądrową prowadzone w IFPiLM związane są w dużej mierze z rozwojem koncepcji reaktora z magnetycznym utrzymaniem plazmy. Jednak część naukowców prowadzi również badania mające znaczenie dla rozwoju koncepcji z inercyjnym utrzymaniem plazmy, a więc z wykorzystaniem impulsów laserowych. W tym wariacie

energia jest produkowana w krótkotrwałych eksplozjach paliwa termojądrowego skupionego w kulistej kapsule i ściśniętego do bardzo dużych gęstości pod działaniem promieniowania laserowego (metoda bezpośrednia) lub promieniowania rentgenowskiego wytworzonego przez laser (metoda pośrednia). Metoda bezpośredniego naświetlania paliwa impulsami laserowymi wymaga zapewnienia bardzo wysokiej symetrii kompresji oraz użycia lasera o bardzo dużej energii, dlatego też obecnie badane są inne warianty fuzji laserowej. Jednym z nich jest szybki zapłon jonowy. W IFPiLM opracowany został zaawansowany, wielowymiarowy kod komputerowy typu 'particle in cell', który umożliwi przeprowadzenie symulacji procesu laserowej akceleracji jonów różnych elementów oraz różnorodnych charakterystyk generowanych wiązek jonowych.

Innym tematem realizowanym w IFPiLM są badania plazmy ablacyjnej wraz z emisją elektronów i jonów, jak również pomiary silnych impulsów elektromagnetycznych generowanych podczas oddziaływania impulsów laserowych z tarczą. Eksperymenty te przeprowadzane są na układzie PALS w Pradze oraz w Laboratorium Laserów Wielkiej Mocy w IFPiLM. Planowane są eksperymenty z użyciem lasera Vulcan w Wielkiej Brytanii (Rutherford-Appleton Laboratory).

Udział jednostek CeNTE w badaniach termojądrowych

Poprzez członkostwo w Asocjacji-EURATOM, w latach 2005-2013, a od roku 2014 w Centrum Nowe Technologie Energetyczne (CeNTE) polskie jednostki naukowe uczestniczą w programie konsorcjum EUROfusion, realizując zadania zgodne z europejską mapą drogową fuzji.

Na tokamaku JET naukowcy z Narodowego Centrum Badań Jądrowych (NCBJ) prowadzą badania spektroskopowych widm rentgenowskich, wyznaczając koncentrację zanieczyszczeń plazmy oraz temperaturę jonową. Parametry te mają znaczenie w ocenie pracy urządzenia, jak również w badaniach zachowania się zanieczyszczeń w plazmie. Ponadto pracownicy NCBJ mają również swój udział w modernizacji kamery oraz spektrometru promieniowania gamma, który działa w oparciu o scyntylator z bromkiem lantanu aktywowanym cerem, wraz z dedykowaną elektroniką i oprogramowaniem.

Naukowcy z Uniwersytetu Opolskiego (UO) uczestniczą z kolei w kalibracji spektrometrów promieniowania VUV na JET, co ma istotne znaczenie przy wyznaczaniu podstawowych parametrów plazmy. Ponadto biorą udział w badaniach widm molekularnych,

co z kolei ma znaczenie zarówno dla analizy mechanizmów erozji ściany, jak i dla badań transportu domieszek w plazmie.

Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) obecny jest na układzie JET poprzez udział pracowników w prace nad charakterystyką i rozkładem cząstek alfa dla różnych scenariuszy plazmy oraz w zadaniach związanych z pomiarami strumieni neutronów i aktywacji komponentów tokamaka. Na JET zainstalowane są, dostarczone przez IFJ PAN, detektory termoluminescencyjne rozmieszczone wewnątrz i na zewnątrz pomieszczenia, w którym znajduje się urządzenie. Służą one do pomiarów neutronowych, a wyniki tych pomiarów są porównywane z rezultatami symulacji.

Akademia Morska w Szczecinie (AM) ma z kolei swój udział w rozwoju modeli wykorzystywanych w kodach równowagi plazmy wykorzystujących pomiary polarymetryczne na JET.

Tokamak JET, ze względu na swoją budowę i wykorzystanie materiałów przewidzianych do budowy reaktora ITER, ma duże znaczenie dla badań materiałowych. Pracownicy Politechniki Warszawskiej (PW) od lat zaangażowani są w prace nad badaniem pyłu osiadającego na elementach wewnętrznych komory, jego morfologii, składu, wielkości, lokalizacji oraz



Fot. 5. Zdjęcie z szybkiej kamery obrazujące odpadające elementy komory w wyniku oddziaływania z szybkimi elektronami na Tore Supra, A. Loarte ITER (<https://www.ugent.be/ea/appliedphysics/en/research/fusion/research/data-analysis.htm>)

Photo 5. Image of plasma-facing components moving into the plasma due to interaction with runaway electrons at Tore Supra tokamak, A. Loarte ITER (<https://www.ugent.be/ea/appliedphysics/en/research/fusion/research/data-analysis.htm>)



Fot. 6. Obszar budowy reaktora ITER, stan na 27 maja 2020. (fot. ITER Organization, EJF Riche)
Photo 6. The ITER reactor construction area, as of May 27, 2020 (Photo: ITER Organization, EJF Riche)

ilości. Ma to znaczenie dla poprawnego działania samego urządzenia, ale też dla działania diagnostyk. Badania luster stosowanych w systemach pomiarowych również wykazują pokrycie materiałem ze ściany tokamaka, a zmodyfikowana w ten sposób powierzchnia może zaburzać sygnały mierzone z plazmy. Elementy konstrukcyjne reaktora termojądrowego narażone są na oddziaływanie z plazmą, a co za tym idzie na obciążenia termiczne oraz strumienie neutronów. Powoduje to zmiany powierzchni materiału, jego degradację, a więc zmiany pierwotnych właściwości. Wyposażenie laboratoriów PW w wysoko wykwalifikowany sprzęt do pomiarów materiałowych umożliwia badania laboratoryjne różnych materiałów, symulacje warunków istniejących w reaktorze i badania defektów powstających w rozważanych materiałach.

Polskie jednostki mają również znaczący udział w eksperymentach prowadzonych na mniejszych tokamakach. Na układzie ASDEX Upgrade naukowcy z IFJ i UO uczestniczą w badaniu zachowania zanieczyszczeń plazmy w różnych warunkach. Na drodze wprowadzania do plazmy kapsulek z azotem lub pierwiastków odparowanych laserowo przez system LBO (z ang. laser blow-off) badany był transport wolframu oraz tworzenie molekuł i ich wpływ na zachowanie plazmy. Podobnie na tokamaku TCV – naukowcy z IFJ PAN uczestniczą w eksperymentach mających na celu

badanie obserwowanej asymetrii miękkiego promieniowania rentgenowskiego, spowodowanej dodatkowym grzaniem plazmy. Na czeskim tokamaku COMPASS, a wcześniej na portugalskim ISTTOK i włoskim FTU, pracownicy NCBJ testowali detektory promieniowania Cherenkova, jako diagnostykę do pomiarów szybkich elektronów w plazmie. Detektory te korzystają z diamentowej głowicy i mogą składać się z kilku kanałów, co umożliwi pomiary w różnych zakresach energetycznych. Badania elektronów nadtermicznych są bardzo istotne, ponieważ takie elektrony mogą nawet doprowadzić do uszkodzenia komory reaktora, co miało miejsce w przeszłości na tokamaku Tore Supra we Francji (obecnie urządzenie to jest przekształcane w tokamak WEST (z ang. W (*tungsten*) Environment in *Steady-state Tokamak*).

Wartym podkreślenia jest wkład Polski do powstania stellaratora Wendelstein 7-X. Inżynierowie i technicy z IFJ PAN brali udział przy budowie urządzenia, natomiast Narodowe Centrum Badań Jądrowych miało swój wkład w budowę komponentów iniektora atomów. Obecnie udział Polski w programie W7-X dotyczy rozwoju diagnostyk miękkiego promieniowania rentgenowskiego, w czym – obok IFPiLM – uczestniczy również UO. Naukowcy z tych jednostek biorą udział w kampaniach eksperymentalnych obsługujących zaprojektowane i zbudowane przez siebie systemy,

jak również analizują wyniki badań w kontekście optymalizacji pracy urządzenia. Samo urządzenie zostało uruchomione stosunkowo niedawno, bo pod koniec 2015 r., i w związku z tym nadal część diagnostyk wymaga ujednoczonego systemu akwizycji. Naukowcy z Politechniki Łódzkiej (PŁ) mają swój udział w projekcie przygotowania ogólnego systemu akwizycji oraz oprogramowania, które pozwoli na szybką integrację wybranych kamer na W7-X.

W badaniach nad energetyką termojądrową bardzo istotne jest wsparcie od strony technik informatycznych, obok prac eksperymentalnych, inżynierskich i technicznych. Poznańskie Centrum Superkomputerowo-Sieciowe (PCSS) – centrum naukowo-badawcze afiliowane przy Instytucie Chemii Bioorganicznej PAN – należy do zespołu konsorcjum EUROfusion, wspierającego naukowców tworzących kody numeryczne; wsparcie to dotyczy przystosowania kodów do standardów wymaganych dla ITER-a.

Poza pracami na rzecz ITER-a Centrum NTE ma również swój udział w opracowaniu koncepcji przyszłej demonstracyjnej elektrowni termojądrowej DEMO. Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie (ZUT) uczestniczy w zadaniu mającym na celu opracowanie systemu do odprowadzania ciepła z reaktora. Naukowcy ZUT opracowali model obiegu parowo-wodnego dla elektrowni oraz badają jego pracę w warunkach nominalnych i przy zredukowanej mocy grzewczej, co ma znaczenie dla przyszłych konstruktorów DEMO. Dodatkowo ZUT uczestniczy w pracach nad analizą ciepłno-hydrauliczną uzwojenia zaprojektowanego dla cewek magnetycznych reaktora.

DEMO to program, w ramach którego rozwój nowych materiałów jest jednym z kluczowych zadań (materiały te będą narażone na wysokie strumienie neutronów). W celu pomiaru odporności i zmian właściwości materiałów napromieniowanych neutronami o energii 14 MeV, które są produktami najbardziej wydajnej reakcji deuter-tryt, planowana jest budowa urządzenia IFMIF (z ang. International Fusion Materials Irradiation Facility) w Japonii oraz urządzenia DONES (z ang. DEMO-Oriented Neutron Source) w Europie. Obydwa urządzenia będą stanowiły unikalne źródła neutronów o parametrach występujących w przyszłych reaktorach termojądrowych. W zadania związane z tymi projektami, w szczególności z projektem DONES, zaangażowani są naukowcy z IFJ PAN, NCBJ, PW oraz IFPiLM. Prace dotyczą analiz jądrowych służących określeniu parametrów projektowanego źródła, jego optymalizacji oraz przygotowaniu wstępnych projektów niektórych modułów urządzenia. Projekt DONES jest obecnie w fazie przygotowań, rozpoczę-

cie budowy samego laboratorium powinno nastąpić w 2022 r.

Na zakończenie warto dodać, że Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu (UMK) realizuje z kolei prace socjo-ekonomiczne związane z fuzją, poprzez identyfikację ekonomicznych i społecznych warunków sprzyjających rozwojowi badań nad energetyką termojądrową. Wnioski z prowadzonych analiz i badań opinii publicznej pokazują, jak efektywnie wspierać szerokie zastosowanie fuzji w przyszłym globalnym rynku energii.

Podsumowanie

Badania nad kontrolowaną syntezą jądrową realizowane są w Polsce w wielu ośrodkach naukowych. Część jednostek, członków Centrum naukowo-przemysłowego Nowe Technologie Energetyczne, prowadzi projekty związane z europejską mapą drogową fuzji, uczestnicząc w projektach konsorcjum EUROfusion, inne realizują niezależnie kontrakty badawcze zlecane bezpośrednio przez Organizację ITER (na przykład Politechnika Łódzka), czy też przez agencję F4E, (IFJ PAN i Politechnika Wroclawska). Przekrój prowadzonych prac obejmuje szereg różnych dziedzin nauki – od fizyki, chemii, energetyki, poprzez inżynierię materiałową, aż po elektronikę. W Polsce nie ma urządzenia fuzyjnego, duża więc część doświadczenia zdobywana jest za granicą, poprzez uczestnictwo w eksperymentach na działających tokamakach czy stellaratorach. Opanowanie technologii energetyki termojądrowej będzie niewątpliwie przełomowym wydarzeniem dla całego świata, warto więc wiedzieć, że także Polska będzie miała w tym swój udział.

*dr hab. Monika Kubkowska,
dr hab. Andrzej Gałkowski,
Instytut Fizyki Plazmy
i Laserowej Mikrosyntezy im. S. Kaliskiego,
Warszawa*