

## **Badania i rozwój technologii dla kontrolowanej fuzji termojądrowej**

Główne osiągnięcia projektu realizowanego w latach 2011 – 2014  
w ramach strategicznego projektu badawczego NCBiR:  
„Technologie wspomagające rozwój bezpiecznej energetyki jądrowej”  
przez Konsorcjum naukowo-przemysłowe w składzie:

Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego PAN (Lider Konsorcjum)  
Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydz. Energetyki i Paliw  
Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy  
Narodowe Centrum Badań Jądrowych  
Politechnika Warszawska, Wydz. Inżynierii Materiałowej  
Przedsiębiorstwo Projektowo-badawcze i Produkcyjno-usługowe ACS Sp. z o.o.

### **Research and development of technology for the controlled thermonuclear fusion.**

The main achievements of the project carried out in 2011-2014 in the framework of a strategic research project financed by the National Centre for Research and Development (NCBiR):

„Technologies supporting the development of safe nuclear power”  
by Scientific-industrial Consortium of

Institute of Nuclear Physics, Polish Academy of Sciences (Consortium Leader)  
AGH University of Science and Technology, Faculty of Energy and Fuels  
Institute of Plasma Physics and Laser Microfusion  
National Centre for Nuclear Research  
Warsaw University of Technology, Faculty of Materials Science and Engineering  
Company Design and Research and Production and Service ACS Sp. z o.o.



Jednym z najbardziej intensywnie rozwijanych programów UE o bardzo wysokim potencjale innowacyjności są badania dla energetyki termojądrowej, mające doprowadzić do zbudowania prototypowego reaktora termojądrowego zdolnego do zasilania elektrowni o mocy 2000 – 5000 MW. Jest to jedna z najbardziej zaawansowanych technologicznie dziedzin nauki. Prace prowadzone są w ramach wielkich międzynarodowych projektów zarządzanych bezpośrednio przez Komisję Europejską. Obecnie realizacja programu fuzji termojądrowej (t-j) koncentruje się wokół europejskich urządzeń: tokamaków JET i ITER oraz stellaratora W7-X i obejmuje głównie rozwój metod diagnostyki plazmy t-j i badania materiałowe.

Dla potrzeb i możliwości włączenia się Polski do tych kierunków badawczych powstały w kraju, w wyniku realizacji Zadania Badawczego, nowoczesne **laboratoria badawcze** źródłami plazmowymi PF-1000U (IFPiLM) i PF-360 (NCBJ) a także dedykowane dla potrzeb fuzji t-j Laboratorium Aparaturowych Źródeł Neutronów im. prof. Jana A. Czubka w IFJ PAN (w tym PF-24 i generator neutronów 14 MeV) oraz unikatowe w skali światowej źródło neutronów 14 MeV, tzw. konwerter litowo-deuterowy w reaktorze MARIA (NCBJ).

Wykonano i uruchomiono szereg **układów pomiarowych** w IFJ PAN, IFPiLM i NCBJ dla diagnostyki plazmy t-j, w tym nowoczesne, oryginalne rozwiązania z wykorzystaniem detektorów diamentowych, quasi-punktowych detektorów scyntylacyjnych, detektorów śladowych i luminescencyjnych. Zbudowano detektor do dwuwymiarowego obrazowania struktur plazmowych w zakresie promieniowania rentgenowskiego a także szybką, wielokadrową kamerę wizyjną przeznaczoną do rejestracji procesów erozji tarczy obciążanej impulsowymi strumieniami plazmy, która stanowi nowatorskie rozwiązanie firmy ACS. Kamera zaprojektowana, zbudowana i uruchomiona w Laboratorium ACS Sp. z o.o. w Warszawie nadaje się do produkcji małoseryjnej.

Realizacja Zadania Badawczego obejmowała **badania materiałowe** (PW WIM, IFPiLM, NCBJ, AGH) poparte modelowaniem matematyczno-fizycznym z zakresu oddziaływania intensywnych strumieni plazmy z pierwszą ścianą reaktora t-j, badaniami i rozwojem materiałów o bardzo dużej wytrzymałości na obciążenia cieplne i radiacyjne, a także badania produkcji i aktywności nuklidów promieniotwórczych w materiałach konstrukcyjnych. W ramach badań nad rozwojem materiałów dla reaktorów t-j opracowano metodę wytwarzania stopowanych proszków wolframowych, które posłużą wytwarzaniu elementów reaktora t-j w technologii metalurgii proszków. Opracowane rozwiązanie zgłoszono do ochrony patentowej; P-408837 „*Stopowy proszek do wytwarzania stopów wolframu metodą metalurgii proszków*”

Zostały również podjęte prace w AGH związane z rozwojem badań dla nowej generacji badawczych reaktorów termojądrowych, w tym reaktorów hybrydowych typu mirror.

Wyniki badań zostały opublikowane w 32 czasopismach naukowych i zaprezentowane na 29 konferencjach. Tematyka badawcza stała się podstawą 6 prac doktorskich i habilitacyjnych oraz 5 prac magisterskich i inżynierskich. W wyniku realizacji projektu polskie zespoły badawcze z sukcesem włączyły się do realizacji europejskich projektów badawczych EUROfusion i Fusion for Energy.

Obszerny opis zrealizowanych prac przedstawiono w opracowaniu: *Badania i rozwój technologii dla kontrolowanej fuzji termojądrowej, główne osiągnięcia projektu realizowanego w latach 2011–2014 w ramach strategicznego projektu badawczego NCBiR: „Technologie wspomagające rozwój bezpiecznej energetyki jądrowej”*, red. U. Woźnicka, 2014, wyd. IFJ PAN, Kraków, 196 str., ISBN 978-83-63542-28-3.

[http://www.ifj.edu.pl/pro/fuz\\_termo.php?lang=pl](http://www.ifj.edu.pl/pro/fuz_termo.php?lang=pl)

One of the most intensely developed EU programs with a very high potential of innovation research for fusion energy, designed to lead to the construction of a prototype fusion reactor

capable to supply of a power plant with a capacity of 2000 - 5000 MW. It is one of the most technologically advanced fields of science. Works are conducted within the framework of large international projects managed directly by the European Commission. Currently, implementation of the program of thermonuclear fusion (t-f) focuses on tokamaks JET and ITER and the W7-X stellarator and includes mainly the development of methods for plasma diagnostics and materials research.

For the purposes and possibility of including Poland to these research directions, there were created in the country, as a result of the NCBiR Project, modern laboratories with plasma sources PF-1000U (IPPLM) and PF-360 (NCBJ) and dedicated to the needs of the fusion research – Prof. Jan Czubek's Laboratory of Apparatus Neutron Sources at IFJ PAN (including PF-24 and 14MeV neutron generator) and unique in the world high efficiency 14 MeV neutron source, the so-called *lithium-deuterium converter* in the MARIA reactor (NCBJ).

A number of measuring systems for plasma diagnostics based on single crystal diamond detectors, quasi-point scintillation detectors, solid state track and luminescent detectors were manufactured and launched in the IFJ PAN, and NCBJ. A 2D imaging technology of soft X-ray plasma radiation was worked out at IPPLM and a prototype detector was constructed for needs of plasma impurity monitoring diagnostics. An innovative solution from ACS Company, i.e., a high-speed multiframe imager for recording erosion shield of load pulse jets of plasma is a significant achievement of the project. The camera was designed, built and commissioned in the Laboratory of ACS, Warsaw, and is suitable for small batch production.

Task concerning the material engineering science (PM WIM, IPPLM, NCBJ, AGH) was supported by modeling of mathematics and physics from the extent of the impact of intense plasma with the first wall of the reactor and concerned the research and development of materials with a very high resistance to thermal and radiation loads as well as research of production of radionuclides in construction materials.

The study on the development of materials for reactors, i.e. a method for producing alloyed powder for fabrication of tungsten alloy by powder metallurgy that will serve the manufacture of reactor components was carried on. The developed solution is reported for patent protection; P-408837, "*Alloyed powder for fabrication tungsten alloy powder metallurgy*".

A work related to the development for the next generation of fission-fusion reactors, including the hybrid mirror type reactor has also been undertaken at AGH.

The results of research have been published in 32 scientific journals and presented at 29 conferences. Research topics became the basis of 6 doctoral theses and habilitation dissertations and also of 5 master and engineering theses. The Polish research teams have successfully integrated the implementation of the European EUROfusion and Fusion for Energy research projects.

A comprehensive description of the completed works is shown in the report: *Research and development of technology for the controlled thermonuclear fusion, the main achievements of the project carried out in 2011-2014 in the framework of a strategic research project financed by the National Centre for Research and Development: "Technologies supporting the development of safe nuclear power"*, ed. U. Woźnicka, 2014, IFJ PAN Kraków, 196 pp., ISBN 978-83-63542-28-3. [http://www.ifj.edu.pl/pro/fuz\\_termo.php?lang=pl](http://www.ifj.edu.pl/pro/fuz_termo.php?lang=pl)