

AUTOREFERAT

Dr Agata Chomiczewska (z d. Czarnecka)

Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy

Hery 23, 01-497 Warszawa

Warszawa, kwiecień 2019

Spis treści

1	DANE OSOBOWE	3
2	POSIADANE DYPLOMY, STOPNIE NAUKOWE	3
3	INFORMACJE O DOTYCHCZASOWYM ZATRUDNIENIU W JEDNOSTKACH NAUKOWYCH ...	3
4	Wskazanie osiągnięcia* wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311.):.....	4
4.1	Tytuł osiągnięcia naukowego	4
4.2	Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego (autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa, recenzenci wydawniczy)	4
4.3	Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania	7
4.3.1	Omówienie celu naukowego	7
4.3.2	Omówienie osiągniętych wyników	10
4.3.3	Wnioski	34
5	OPIS INNYCH OSIĄGNIĘĆ NAUKOWYCH	35
6	Dane bibliometryczne: kwiecień 2019	41
7	Wykaz innych (niewchodzących w skład osiągnięcia wymienionego w pkt 4.2) opublikowanych prac naukowych	41
7.1	Publikacje naukowe w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports (JRC).....	41
7.2	Publikacje naukowe w czasopismach międzynarodowych lub krajowych innych niż znajdujące się w bazie JCR	49
8	Słowniczek skrótów i sformułowań specjalistycznych	57

1 DANE OSOBOWE

AGATA CHOMICZEWSKA (z d. CZARNECKA)

2 POSIADANE DYPLOMY, STOPNIE NAUKOWE

Dyplom doktora fizyki, 2012

Narodowe Centrum Badań Jądrowych

Tytuł rozprawy doktorskiej:

„Badanie zanieczyszczeń plazmy termojądrowej w tokamaku JET z zastosowaniem nowej techniki spektroskopowej z zakresu VUV”

Promotor: Prof. dr hab. Jerzy Wołowski

Recenzenci: Prof. dr hab. Marek Sadowski

Prof. dr hab. Józef Musielok

Dyplom magistra fizyki, 2004

Uniwersytet Warszawski Wydział Fizyki

Tytuł pracy magisterskiej:

„Fotoelektryczne badanie układu nanostrukturalnego C₆₀+Hg”

Promotor: dr hab. Elżbieta Czerwosz

Dyplom licencjata fizyki, 2002

Uniwersytet Warszawski Wydział Fizyki

Tytuł pracy licencjackiej:

„Tematyka badawcza i metody pomiarowe dotyczące badań spektroskopii fullerenów w Pracowni Oddziaływań Międzycząsteczkowych”

Promotor: dr hab. Elżbieta Czerwosz

3 INFORMACJE O DOTYCHCZASOWYM ZATRUDNIENIU W JEDNOSTKACH NAUKOWYCH

Od 2014 kierownik Laboratorium Badań Plazmy Metodami Spektroskopowymi w Zakładzie Fuzji Jądrowej i Spektroskopii Plazmy

Od 2014 Adiunkt w Zakładzie Fuzji Jądrowej i Spektroskopii Plazmy w Instytucie Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy

W latach 2012 – 2014 Adiunkt w Oddziale Plazmy w Polu Magnetycznym w Instytucie Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy

W latach 2007 – 2012 Asystent w Oddziale Plazmy Laserowej w Instytucie Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy

W latach 2005 – 2007 Asystent w Oddziale Fizyki Plazmy Wytwarzanej Laserem w Instytucie Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy

4 Wskazanie osiągnięcia* wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311.):

4.1 Tytuł osiągnięcia naukowego

Badania zanieczyszczeń plazmy utrzymywanej w polu magnetycznym w celu optymalizacji technologii termojądrowej konwersji energii

4.2 Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego (autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa, recenzenci wydawniczy)

- [A1] **A. Czarnecka**, N. Krawczyk, P. Jacquet, E. Lerche, V. Bobkov, C. Challis, D. Frigione, J. Graves, K. D. Lawson, M.J. Mantsinen, L. Meneses, E. Pawelec, T. Pütterich, M. Sertoli, M. Valisa, D. Van Eester, and JET Contributors, 2019, **Analysis of metallic impurity content by means of VUV and SXR diagnostics in hybrid discharges with hot-spots on the JET-ILW poloidal limiter**, *Plasmy Physisc and Conrroled Fusion*, 61, 085004
- [A2] **A. Czarnecka**, 2018, **Polish involvement in experimental campaigns at European tokamaks in context of plasma impurity studies**, *Proc. of SPIE Vol. 10808 108084B-1*
- [A3] **A. Czarnecka**, 2018, **Studies of impurities behaviour for the optimization of plasmas and heating scenarios at tokamaks in perspective for ITER**, *Problems of atomic science and technology*, № 6. Series: Plasma Physics (118), p. 54-58
- [A4] **A. Czarnecka**, T. Fornal, M. Gruca, N. Krawczyk, M. Kubkowska, S. Jabłońska, L. Ryć, T. Andreeva, A. Alonso, R. Burhenn, B. Buttenschön, A. Dinklage, M. Jakubowski, M. Krychowiak, R. König, N. Pablant, H. Thomsen, D. Zhang, the W7-X team, 2018, **Study of impurity behaviour for first magnetic configuration changes in W7-X plasmas by means of PHA spectra**, *Fusion Engineering and Design* 136, 1286-129
- [A5] N. Krawczyk, **A. Czarnecka**, I. Ivanova-Stanik, R. Zagórski, C. Challis, D. Frigione, C. Giroud, J. Graves, M. J. Mantsinen, S. Silburn, and JET Contributors, (2018), **Application of the VUV and the soft x-ray systems on JET for the study of intrinsic impurity behavior in neon seeded hybrid discharges**, *Review of Scientific Instruments* 89, 10D131
- [A6] M. Goniche, R. Dumont, V. Bobkov, P. Buratti, S. Brezinsek, F. Casson, C. Challis, L. Colas, **A. Czarnecka**, N. Fedorczak, J. Garcia, C. Giroud, M. Graham, J. P. Graves, P. Jacquet, E. Lerche, P. Mantica, I. Monakhov, P. Monier-Garbet, M.F.F. Nave, C. Noble, I. Nunes, T. Pütterich, F. Rimini, M. Valisa, D. Van Eester and JET Contributors, 2017, **Ion**

Cyclotron Resonance Heating for tungsten control in various JET H-mode scenarios,
Plasma Physics Controlled Fusion 59, 055001

- [A7] G Telesca, I. Ivanova-Stanik, R. Zagórski, S. Brezinsek, **A. Czarnecka**, P. Drewelow, C. Giroud, A. Huber, S. Wiesen, M. Wischmeier, 2017, **Simulation of JET ITER-Like Wall pulses at high neon seeding rate** Nuclear Fusion 57, 126021
- [A8] V. Bobkov, D. Aguiam, M. Baruzzo, D. Borodin, I. Borodkina, S. Brezinsek, I. Coffey, L. Colas, **A. Czarnecka**, E. Delabie, P. Dumortier, F. Durodie, R. Dux, H. Faugel, H. Fünfgelder, C. Giroud, M. Goniche, J. Hobirk, A. Herrmann, J. Jacquot, Ph. Jacquet, A. Kallenbach, A. Krivska, C.C. Klepper, E. Lerche, S. Menmuir, D. Milanesio, R. Maggioral, I. Monakhov, F. Nave, R. Neu, J.-M. Noterdaeme, R. Ochoukov, Th. Pütterich, M. Reinke, A. Tuccilo, O. Tudisco, D. Van Eester, Y. Wang, Q. Yang, W. Zhang, ASDEX Upgrade Team, the EUROfusion MST1 Team and JET contributors, 2017, **Progress in reducing ICRF-specific impurity release in ASDEX upgrade and JET**, Nuclear Materials and Energy 12, 1194–1198
- [A9] E. Lerche, M. Goniche, P. Jacquet, D. Van Eester, V. Bobkov, L. Colas, C. Giroud, I. Monakhov, F. Rimini, M. Baruzzo, T. Blackman, S. Brezinsek, M. Brix, F. Casson, **A. Czarnecka**, K. Crombé, C. Challis, R. Dumont, J. Eriksson, N. Fedorczak, M. Graham, J. Graves, G. Gorini, J. Hobirk, E. Joffrin, T. Johnson, Y. Kazakov, V. Kiptily, A. Krivska, M. Lennholm, P. Lomas, C. Maggi, P. Mantica, G. Mathews, M.-L. Mayoral, L. Meneses, J. Mlynar, P. Monier-Garbet, M. F. Nave, C. Noble, M. Nocente, I. Nunes, J. Ongena, G. Petravich, V. Petrzilka, T. Pütterich, M. Reich, M. Santala, E. Solano, A. Shaw, G. Sips, M. Tardocchi, M. Tsalas, M. Valisa and JET Contributors, 2016, **Optimization of ICRH for core impurity control in JET-ILW**, Nuclear Fusion 56, 036022
- [A10] **A. Czarnecka**, V. Bobkov, R. Dux, T. Pütterich, M. Sertoli, 2015, **Trends of W behaviour in ICRF assisted discharges in ASDEX Upgrade**, Journal of Nuclear Materials Volume 463, Pages 601-604
- [A11] G. Telesca, I. Ivanova-Stanik, R. Zagorski, S. Brezinsek, **A. Czarnecka**, P. Drewelow, C. Giroud, S. Marsen, M. Wischmeier and JET EFDA contributors, 2015, **Numerical Simulations of JET Discharges with the ITER-Like Wall for Different Nitrogen Seeding Scenarios**, Journal of Nuclear Materials 463, 577-581
- [A12] M.-L. Mayoral, V. Bobkov, **A. Czarnecka**, I. Day, A. Ekedahl, P. Jacquet, M. Goniche, R. King, K. Kirov, E. Lerche, J. Mailloux, D. Van Eester, O. Asunta, C. Challis, D. Ciric, J.W. Coenen, L. Colas, C. Giroud, M. Graham, I. Jenkins, E. Joffrin, T. Jones, D. King, V. Kiptily, C.C. Klepper, C. Maggi, R. Maggiora, F. Marcotte, G. Matthews, D. Milanesio, I. Monakhov, M. Nightingale, R. Neu, J. Ongena, T. Pütterich, V. Riccardo, F. Rimini, J. Strachan, E. Surrey, V. Thompson, G. Van Rooij and JET EFDA Contributors, 2014, **On the challenge of plasma heating with the JET metallic wall**, Nuclear Fusion 54, 033002
- [A13] E. Lerche, D. Van Eester, P. Jacquet, M.-L. Mayoral, V. Bobkov, L. Colas, **A. Czarnecka**, K. Crombé, I. Monakhov, F. Rimini, M. Santala and JET-EFDA Contributors, 2014, **Impact of minority concentration on fundamental (H)D ICRF heating performance in JET-ILW**, Nuclear Fusion 54, 073006

- [A14] C. F. Maggi, E. Delabie, T. M. Biewer, M. Groth, N. C. Hawkes, M. Lehnen, E. de la Luna, K. Mc. Cormick, C. Reux, F. Rimini, E. R. Solano, Y. Andrew, C. Bourdelle, V. Bobkov, M. Brix, G. Calabro, **A. Czarnecka**, J. Flanagan, E. Lerche, S. Marsen, I. Nunes, D. Van Eester, M. F. Stamp and JET EFDA Contributors, 2014, **L–H power threshold studies in JET with Be/W and C wall**, Nuclear Fusion 54, 023007
- [A15] **A. Czarnecka**, V. Bobkov, I. H. Coffey, L. Colas, P. Jacquet, K. D. Lawson, E. Lerche, C. Maggi, M.-L. Mayoral, T. Pütterich, D. Van Eester, and JET-EFDA contributors, 2014, **Spectroscopic Investigation of Heavy Impurity Behaviour During ICRH with the JET ITER-Like Wall**, AIP Conf. Proceedings 1580, 227-230
- [A16] T. Pütterich, R. Dux, R. Neu, M. Bernert, M. N. A. Beurskens, V. Bobkov, S. Brezinsek, C. Challis, J. W. Coenen, I. Coffey, **A. Czarnecka**, C. Giroud, P. Jacquet, E. Joffrin, A. Kallenbach, M. Lehnen, E. Lerche, E. de la Luna, S. Marsen, G. Matthews, M-L. Mayoral, R. M. McDermott, A. Meigs, J. Mlynar, M. Sertoli, G. van Rooij, 2013, **Observations on the W-transport in the core plasma of JET and ASDEX Upgrade**, Plasma Physics and Control. Fusion 55, 124036
- [A17] V. Bobkov, G. Arnoux, S. Brezinsek, J.W. Coenen, L. Colas, M. Clever, **A. Czarnecka**, F. Braun, R. Dux, A. Huber, P. Jacquet, C. Klepper, E. Lerche, C. Maggi, F. Marcotte, M. Maslov, G. Matthews, M.L. Mayoral, K. Mc Cormick, A. Meigs, D. Milanesio, I. Monakhov, R. Neu, J.-M. Noterdaeme, Th. Pütterich, F. Rimini, G. VanRooj, G. Sergienko, D. VanEester, 2013, **ICRF specific plasma wall interactions in JET with the ITER-like wall**, Journal of Nuclear Materials 438, S160–S165
- [A18] D. Kalupin, I. Ivanova-Stanik, I. Voitsekhovitch, J. Ferreira, D. Coster, L.L. Alves, Th. Anie, J.F Artaud, V. Basiuk, Jo˜ao P.S. Bizarro, R. Coelho, **A. Czarnecka**, Ph. Huynh, A. Figueiredo, J. Garcia, L. Garzotti, F. Imbeaux, F. Kˆoch, M.F. Nave, G. Pereverzev, O. Sauter, B.D. Scott, R. Stankiewicz, P. Strand, 2013, **Numerical analysis of JET discharges with the European Transport Simulator**, Nuclear Fusion 53, 123007
- [A19] E. Lerche, D. Van Eester, T. Johnson, T. Hellsten, J. Ongena, M.-L. Mayoral, D. Frigione, C. Sozzi, G. Calabro, M. Lennholm, P. Beaumont, T. Blackman, D. Brennan, A. Brett, M. Cecconello, I. Coffey, A. Coyne, K. Crombe, **A. Czarnecka**, R. Felton, C. Giroud, G. Gorini, C. Hellesen, P. Jacquet, V. Kiptily, S. Knipe, A. Krasilnikov, M. Maslov, I. Monakhov, C. Noble, M. Nocente, L. Pangioni, I. Proverbio, G. Sergienko, M. Stamp, W. Studholme, M. Tardocchi, V. Vdovin, T. Versloot, I. Voitsekhovitch, A. Whitehurst, E. Wooldridge, V. Zoita and JET EFDA Contributors, 2012, **Experimental investigation of ICRF heating scenarios for ITER’s half-field Hydrogen phase performed in JET**, Plasma Physics Controlled Fusion 54, 074008

Większość publikacji wchodzących w skład cyklu habilitacyjnego powstała w wyniku prac prowadzonych w dużym zespole badawczym na największych układach termojądrowych JET, ASDEX-Upgrade i W7-X. Członkowie tych zespołów pełnili różne funkcje tj.: TFL (Task Force Leaders), SC (scientific coordinators), DC (diagnostic coordinator), czyli koordynatorzy eksperymentów i diagnostyk podczas sesji pomiarowych, obsługa techniczna wielu diagnostyk, systemów grzania itp., uczeni odpowiedzialni za modelowanie numeryczne i za analizy danych doświadczalnych.

Wykaz opublikowanych prac naukowych z opisem mojego wkładu w powstanie publikacji oraz informacje o osiągnięciach dydaktycznych, współpracy naukowej i popularyzacji nauki znajduje się w Załączniku 6_Wykaz opublikowanych prac naukowych oraz informacje o osiągnięciach dydaktycznych, współpracy naukowej i popularyzacji nauki.

Oświadczenia współautorów dotyczące ich wkładu w powstanie prac zgłoszonych, jako osiągnięcie naukowe zamieszczone są w Załączniku 7_Oświadczenia współautorów.

Kopia publikacji stanowiących podstawę ubiegania się o habilitację znajduje się w Załączniku 5_ Kopia publikacji wchodzących w skład osiągnięcia naukowego.

4.3 Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

4.3.1 Omówienie celu naukowego

Stale rosnąca liczba ludności i tempo rozwoju krajów rozwijających się powodują szybki wzrost światowego zapotrzebowania na energię elektryczną. Dziś duża część tej energii wytwarzana jest ze źródeł kopalnych. Zasoby te są jednak ograniczone. Przyjmuje się również, że związana z procesem spalania paliw emisja CO₂ powoduje tzw. efekt cieplarniany, czyli niekorzystne dla ludzkości globalne ocieplenie klimatu. Obecny stan wiedzy pozwala na przyjęcie, że w perspektywie długoterminowej możemy liczyć na wytwarzanie energii elektrycznej: ze źródeł odnawialnych, w oparciu o konwersję energii z reakcji rozszczepienia ciężkich jąder oraz z reakcji syntezy termojądrowej z udziałem najlżejszych jąder, czyli izotopów wodoru. Najbardziej korzystna na ziemi pod względem uwalniania energii jest reakcja D-T, łączenia dwóch izotopów wodoru: deuteru (D) i trytu (T). Opisujemy ją w następujący sposób:



W wyniku tej reakcji powstaje jądro helu-4 i neutron. Uwalnia się łącznie 17,6 MeV energii. Z tego 80 % w postaci energii kinetycznej wyemitowanego neutronu, zaś 20 % w postaci energii kinetycznej wytworzonego jądra helu. Niezbędny do tego procesu deuter będzie pozyskiwany z wody morskiej, której mamy praktycznie nieograniczony zasób. W każdym metrze sześciennym wody morskiej znajdują się 33 gramy deuteru. Szacuje się, że z jednego grama paliwa DT będzie można uzyskać tyle energii, co z 12 ton węgla. Tryt jest szybko rozpadającym się pierwiastkiem promieniotwórczym, który występuje tylko w ilościach śladowych w przyrodzie. Może być jednak wytwarzany podczas reakcji syntezy jądrowej z litem, którego zasoby już są bardzo duże, a pozyskiwanie stosunkowo łatwe. Lit z zasobów lądowych

zapewniłby zapasy wystarczające do eksploatacji elektrowni termojądrowych przez ponad 1000 lat. Co więcej, lit może być wydobywany z wody morskiej, której rezerwy są praktycznie nieograniczone. Wystarczą, aby zaspokoić światowe zapotrzebowanie energetyczne przez około 6 milionów lat. Wytwarzanie trytu będzie się odbywać w reaktorze termojądrowym w reakcjach neutronów uwalnianych z plazmy z litem, którym pokryty będzie wewnętrzny płaszcz (ang. *blanket*) komory reaktora. Mówimy, zatem o energii uzyskiwanej z łatwo dostępnych i w istocie niewyczerpalnych surowców. Oprócz reakcji D-T możliwe są także reakcje D-D i D-³He. Porównując je, widzimy, że reakcja D-T ma największy przekrój czynny przy relatywnie niskich (100-200 mln Kelwinów) temperaturach. W takiej temperaturze materia jest w stanie plazmy. Głównym wyzwaniem naukowców zajmujących się badaniami nad energetyką termojądrową jest opanowanie w sposób kontrolowany syntezy jądrowej. Badania te obejmują obecnie dwa główne kierunki: fuzja z inercyjnym utrzymywaniem plazmy, wytwarzanej za pomocą laserów (ICF) i fuzja z magnetycznym utrzymaniem plazmy (MCF). Ten ostatni kierunek jest przedmiotem mojej pracy naukowej. Tokamaki i stellaratory są jednymi z typów urządzeń z magnetycznym utrzymywaniem plazmy. Warto podkreślić, że prowadziłam swoje badania na największych na świecie urządzeniach obu wymienionych typów. Na tokamakach JET w Culham w Wielkiej Brytanii, ASDEX-Upgrade w Garching w Niemczech, TCV w Lozannie w Szwajcarii, ISTTOK w Lizbonie w Portugalii i na stellaratorach: Wendelstein 7-X w Greifswaldzie w Niemczech, LHD w Toki w Japonii, TJ-II w Madrycie w Hiszpanii, HSX w Wisconsin w USA. Tokamak JET (Joint European Torus) jest największym na świecie działającym urządzeniem eksperymentalnym zdolnym do pracy z mieszaniną paliwową deuterowo-trytową przewidzianą dla reaktora termojądrowego. W tokamaku JET osiągnięto rekordowy poziom mocy z syntezy jądrowej i produkcji energii w warunkach, w których stosunek wytworzonej mocy z syntezy i mocy wejściowej do plazmy, oznaczany, jako Q, - zbliża się do jedności. Ilość energii termojądrowej, którą tokamak jest w stanie wytworzyć, jest bezpośrednim wynikiem liczby reakcji termojądrowych zachodzących w jego centrum. Wiele przeprowadzonych eksperymentów pokazało, że aby uzyskać dodatni bilans energetyczny, konieczne jest zbudowanie znacznie większego reaktora niż JET. Badania na układzie JET realizują, zatem program wspierający ITER, jeden z najbardziej ambitnych projektów energetyczny na świecie. ITER (po łacinie „Droga”), to dziesięciokrotnie większy tokamak kolejnej generacji obecnie budowany w Saint Paul-lez-Durance w południowej Francji. Stanowi efekt wieloletniej współpracy grupy naukowców z krajów takich jak: Chiny, Unia Europejska, Indie, Japonia, Korea, Rosja i Stany Zjednoczone. Na podstawie prawa skalowania oczekuje się, że w układzie ITER parametr Q osiągnie wartości $Q \geq 10$. W układzie

ITER będą przetestowane materiały pierwszej ściany w komorze reaktora. W ostatnich dwóch dekadach badań nad syntezą, w prawie wszystkich urządzeniach termojądrowych, materiałem, którym pokrywano ściany reaktora był głównie węgiel w postaci kompozytów z włókien węglowych CFC (ang. *Carbon Fibre Composites*). Węgiel ma tę zaletę, że jest odporny na wysokie temperatury i ma niską liczbę atomową Z . Ma też wadę polegającą na tym, że reaguje chemicznie z tlenem i wodorem, co prowadzi do erozji ściany i do zatrzymania w niej trytu, czyli retencji paliwa. W 2011 roku tokamak JET rozpoczął pracę z nową ścianą w komorze nazwaną ILW (ang. *ITER-like wall*), która stanowi kombinację berylu w obszarze limitera i wolframu w obszarze tzw. dywertora, znajdującego się na spodzie komory tokamaka. Daje to możliwość testowania oddziaływania plazmy z istotnymi w ITER-ze komponentami pierwszej ściany (ang. *plasma facing componets, PFC*), potocznie określanym, jako oddziaływanie plazma-ściana (ang. *plasma wall interaction, PWI*). Tokamak ASDEX-Upgrade jest urządzeniem średniej wielkości. Od 2002 r. wolfram stosowany jest tam, jako PFC zarówno w obszarze limitera jak i dywertora. Prowadzone na tym układzie badania obejmują obszary i reżimy, w których średniej wielkości tokamaki mają wyjątkowe możliwości eksperymentalne. Stanowią uzupełnienie badań prowadzonych na tokamaku JET, aby zapewnić stopniowe podejście do ekstrapolacji na ITER. W JET limiter jest wystawiony na działanie wysokoenergetycznych cząstek uciekających z plazmy centralnej. Ponieważ beryl jest materiałem o małej liczbie atomowej Z , jego atomy, które na skutek rozpylenia przez wysokoenergetyczne cząstki przenikną do plazmy, przyczynią się w znacznie mniejszym stopniu do rozrzedzenia paliwa plazmowego (ang. *plasma dillution*) i do promieniowania plazmy. Beryl nie wiąże się z trytem i skutecznie usuwa tlen z plazmy. Wolfram ma idealne cechy dla komponentów dywertora, które są narażone na największe obciążenia termiczne i największe strumienie cząstek. Ma wysoki próg rozpylenia (ang. *sputtering*) przez cząsteczki plazmy, najwyższą temperaturę topnienia w porównaniu do innych metali oraz niski wskaźnik retencji paliwa. Jednakże wadą wolframu jest to, że w temperaturach, jakie są osiągnane w urządzeniach typu tokamak, nie ulega on całkowitemu zjonizowaniu, powodując radiacyjne straty energii w plazmie. Akumulacja ciężkich zanieczyszczeń (w szczególności wolframu), stała się problemem, ponieważ oprócz pogorszenia wydajności plazmy, może ona prowadzić do radiacyjnego kolapsu i do zerwania sznura plazmowego. Duża koncentracja zanieczyszczeń w plazmie centralnej może znacznie ograniczyć efektywność dodatkowego grzania plazmy. Może prowadzić do niedopuszczalnego wychładzania i rozrzedzania plazmy. W związku z tym głównym celem mojej pracy badawczej była kontrola zachowania ciężkich zanieczyszczeń i określenie czynników wpływających na ich redukcję w plazmie centralnej. Dzięki czemu

będzie można osiągnąć większą czystość plazmy. Ograniczenie zawartości wolframu w rdzeniu plazmy jest kluczową kwestią dla utrzymania wysokich temperatur. Poprawia się w ten sposób czas utrzymywania plazmy i wzrasta prawdopodobieństwo zajścia reakcji syntezy termojądrowej.

4.3.2 Omówienie osiągniętych wyników

4.3.2.1 Diagnostyki stosowane do charakterystyki zanieczyszczeń

Do zbadania charakterystyki zachowania metalicznych zanieczyszczeń zastosowałam różnego typu diagnostyki. Dekonwolucja sygnałów rejestrowanych za pomocą kamer miękkiego promieniowania rentgenowskiego (SXR) w układzie JET pozwoliła mi na wyznaczenie: profilu koncentracji wolframu, dwuwymiarowego rozkładu promieniowania wolframu w plazmie oraz asymetrii poloidalnych spowodowanych siłami odśrodkowymi. Z poloidalnej asymetrii wyznaczyłam prędkość rotacji plazmy. Do badania wolframu w układzie JET wykorzystałam również diagnostykę spektroskopową z zakresu skrajnego ultrafioletu (XUV). Przy zastosowaniu siatki dyfrakcyjnej 600 g/mm spektrometr rejestrował widma w zakresie długości fali 40-70 Å. W tym obszarze spektralnym obserwowałam promieniowanie quasi-ciągłe (QC) wolframu emitowanego przez jony W^{27+} - W^{35+} oraz promieniowanie liniowe (L) emitowane bliżej rdzenia plazmy przez jony W^{42+} - W^{45+} . Na ich podstawie wyznaczyłam odpowiednio dwie koncentracje wolframu cW_{QC} i cW_L (literka „c” to symbol koncentracji). Taką diagnostykę stosowałam również do wyznaczania koncentracji wolframu w układzie ASDEX-Upgrade. Metodę ilościowego wyznaczania koncentracji wolframu w obu podejściach opisaliśmy w pracy [C36]. Zanieczyszczenia o średnim-Z analizowałam na podstawie danych spektroskopowych z zakresu ultrafioletu próżniowego (VUV). Diagnostyka VUV na układzie JET wyposażona jest w siatkę holograficzną 450 g/mm i rejestruje widma w zakresie długości fali 100-1100 Å. Zakres krótkich długości fal w tym obszarze widma jest zdominowany przez linie niklu (Ni), żelaza (Fe), miedzi (Cu), chromu (Cr) i molibdenu (Mo). Koncentrację tych zanieczyszczeń wyznaczałam na podstawie metody opisanej przeze mnie w pracy [B50]. Aby w pełni wykorzystać pomiary intensywności linii za pomocą spektrometru VUV, konieczna była kalibracja czułości względnej i absolutnej. W przeciwieństwie do instrumentów rejestrujących promieniowanie widzialne, zastosowanie lokalnego źródła kalibracji w tym przypadku było niemożliwe. Usunięcie instrumentu próżniowego z miejsca pracy maszyny do- np. źródła synchrotronowego nie było możliwe z powodu kontaminacji berylem. Dlatego też,

dla tokamaka JET-ILW kalibrację spektrometru VUV w obszarze krótkich długości fali przeprowadziliśmy metodą „in situ”, która polega na zastosowaniu stosunków doświadczalnie i teoretycznie wyznaczonych linii sodu- i lito-podobnych, pochodzących od różnych pierwiastków. Na tej podstawie uzyskaliśmy krzywą czułości względnej. W celu uzyskania bezwzględnej kalibracji dla jednej konkretnej długości fali zastosowaliśmy stosunek intensywności linii węgla mierzonej przy pomocy diagnostyki VUV i intensywności zmierzonych z użyciem wykalibrowanej diagnostyki z zakresu widzialnego (Vis). Uzyskana względna natężeniowa sugerowała bardzo silne pogorszenie czułości w zakresie krótkich fal. Wyniki te nie wydawały się w pełni przekonujące i mogły być wynikiem nakładania się na siebie linii różnych zanieczyszczeń. W związku z tym zaproponowaliśmy nową technikę kalibracji względnej opartej na pomiarach widma ciągłego wolframu w zakresie długości fali 200-400 Å [A1], [A2]. Do scharakteryzowania źródła wolframu w obszarze dywertora i limitera zastosowałam spektroskopię z zakresu światła widzialnego (Vis). Efektywna wydajność wolframu (Y_{eff}) (ang. *effective W yield*) powiązana była bezpośrednio ze stosunkiem strumienia wolframu i strumienia deuteru w punktach obserwacji. Strumień wolframu monitorowałam za pomocą pomiaru intensywności linii WI przy 4009 Å, natomiast strumień deuteru na podstawie linii Balmer- δ DI przy 4101 Å. Diagnostykę bolometryczną rutynowo wykorzystywałam do określenia mocy promieniowania z plazmy. Efektywny ładunek plazmy Z_{eff} , wyznaczyłam na podstawie promieniowania Bremsstrahlung w zakresie promieniowania widzialnego.

4.3.2.2 Wpływ dodatkowego grzania w reżimie niskiego utrzymywania plazmy (ang. L-mode)

Kampanie eksperymentalne prowadzone na tokamaku JET poświęcone są optymalizacji reżimów operacyjnych ITER-a w obecności ILW. Podstawowym celem programu badań na układzie JET było opracowanie technik bezpiecznego zwiększenia mocy grzania plazmy, przy jednoczesnej kontroli ciężkich zanieczyszczeń. Dodatkowa moc grzania w układzie JET-ILW jest dostarczana przez dwa systemy: NBI (*Neutral Beam Injection*) - wiązką cząstek neutralnych oraz ICRH (*Ion Cyclotron Resonance Heating*) - falami elektromagnetycznymi o częstotliwościach w zakresie jonowego rezonansu cyklotronowego. Wiadomo jest jednak, że proces grzania ICRH może powodować dodatkowe obciążenia cieplne na komponentach pierwszej ściany [B51], ograniczając w ten sposób żywotność komponentów. Grzaniu ICRH towarzyszy też zwiększona produkcja metalicznych zanieczyszczeń [B44]. Może to prowadzić do niedopuszczalnego w plazmie poziomem zanieczyszczeń o wysokim Z . W związku z tym początkowe eksperymenty z grzaniem ICRH w JET-ILW przeprowadziliśmy w celu

sprawdzenia, czy zastosowanie grzania ICRH prowadzi do zwiększenia poziomu wolframu w plazmie, jak również w celu porównania tego z poziomem zanieczyszczeń osiąganym podczas grzania NBI. Badania wykazały, że przy tej samej średniej gęstości plazmy w modzie-L, zastosowanie grzania ICRH skutkuje wyższą mocą promieniowania plazmy i wyższą koncentracją zanieczyszczeń w porównaniu z tym samym poziomem mocy dostarczanej przez system NBI [A17], [A12]. Wolfram był głównym radiatorem podczas grzania ICRH, a jego frakcja promieniowania mieściła się w zakresie 60-80 % całkowitej mocy promieniowania plazmy. Reszta promieniowania pochodziła od zanieczyszczeń niklem. Wzrost koncentracji niklu podczas grzania ICRH miał niewielki wpływ na pracę tokamaka JET, zarówno ze ścianą węglową [B44] jak i z ILW. Wyższe wartości koncentracji zanieczyszczeń wyznaczonej na podstawie promieniowania quasi-ciągłego (cW_{QC}) w stosunku do promieniowania liniowego (cW_L) wskazywały na wgłębiony profil wolframu (ang. *hollow profile*) w centrum plazmy. W przypadku grzania NBI wartości cW_{QC} były niższe od cW_L , co świadczyło wypikowanym profilem wolframu. Różnice w profilu koncentracji wolframu dla grzania ICRH i NBI wskazują na różnicę w źródle wolframu lub transporcie zanieczyszczeń. Pierwszy aspekt został dokładnie zbadany i przedstawiony w pracy [A17], a drugi w pracy [A18].

Zmiana zawartości zanieczyszczeń w plazmie podczas grzania ICRH może być implikacją wzrostu źródła zanieczyszczeń, spowodowanego przez trzy mechanizmy: 1) rozpylanie (ang. *sputtering*), 2) odparowywanie termiczne i topnienie, 3) rozpylanie przez szybkie cząstki przyspieszane na skutek grzania ICRH (tzw. efekt *RF-sheath*) (ang. *Radio Frequency - sheath*). Zjawisko fizycznego sputteringu jest wynikiem elastycznego transferu energii pomiędzy cząsteczkami plazmy a atomami powierzchni ściany, które mogą być wybijane, jeżeli ilość przekazanej im energii jest wystarczająca, aby pokonać energię wiązania powierzchniowego. Efekt typu „*RF-sheath*” pojawia się dzięki istnieniu składowej pola elektrycznego wytwarzanego w pobliżu anten grzania ICRH, równoległej do pola magnetycznego $E_{||}$. Ze względu na różne prędkości jonów i elektronów wzdłuż linii pola magnetycznego- równoległe pole elektryczne $E_{||}$ indukuje potencjał. Potencjał ten przyspiesza jony plazmy do energii kilkuset eV wywołując obciążenia cieplne na PFC i rozpylanie materiału. Należało, więc zwrócić szczególną uwagę na połączenie liniami pola magnetycznego aktywnych anten grzania ICRH z komponentami ściany wykonanymi z materiałów o dużym Z. Pierwszym najbardziej oczywistym źródłem wolframu był dywertor, ponieważ ma on największy obszar oddziaływania wolframu z plazmą. Źródło wolframu w dywertorze można wytłumaczyć w ten sposób, że jest on rozpylany w tym obszarze przez jony lekkich zanieczyszczeń, w szczególności przez jony Be. Jednakże, nie zarejestrowaliśmy

wzmoczonego wzrostu promieniowania wolframu w obszarze dywertora podczas grzania ICRH w porównaniu z grzaniem NBI [A17]. Takie zachowanie obserwowaliśmy we wszystkich porównaniach, przy małych i średnich gęstościach plazmy. Podczas grzania ICRH, osiągnięte były niższe temperatury na płytach dywertora, a co za tym idzie mierzony był niższy sputtering wolframu, w porównaniu do fazy z grzaniem NBI. Okazało się jednak, że przy tej samej temperaturze płyt, źródło W podczas grzania ICRH było o około 25 % wyższe niż podczas stosowania NBI. Również w plazmie limiterowej (przesuniętej w górę, z dala od dywertora) faza grzania NBI charakteryzowała się niższą koncentracją wolframu w porównaniu do fazy ICRH. Wskazywało to na inne możliwe źródła wolframu. Pojawiły się pewne oznaki zwiększonego rozpylania wolframu na wejściu dywertora, połączonego liniami pola magnetycznego z aktywną anteną ICRH. Zjawisko to było dokładniej badane dla serii wyładowań ze zmiennym polem magnetycznym i modulowaną mocą ICRH z poszczególnych anten w pracy [B39], [B3].

Zmiana zawartości zanieczyszczeń w plazmie w dużym stopniu może być spowodowana zmianą transportu cząstek w plazmie brzegowej, jak również w plazmie centralnej. W celu wyjaśnienia zaobserwowanej doświadczalnie różnicy w całkowitych stratach radiacyjnych w trakcie grzania ICRH i NBI, w pracy [A18] zbadaliśmy wpływ transportu zanieczyszczeń. Nowy europejski kod-symulator transportu (ETS - European Transport Simulator), opracowany przez zintegrowaną grupę zadaniową ds. modelowania tokamaka (ITM-TF) został po raz pierwszy zastosowany do symulacji transportu zanieczyszczeń w plazmie w JET. Uzyskaliśmy w ten sposób stosunkowo dobrą zgodność wyników symulacji i eksperymentu dla obu faz grzania. Udowodniliśmy, że w obu fazach: z ICRH i NBI promieniowanie z plazmy centralnej było zdominowane przez wolfram. Miało to miejsce z największym udziałem jonów W^{25+} - W^{35+} . Promieniowanie brzegowe było zdominowane przez jony Ni, natomiast Be nie przyczynił się w dużym stopniu do strat radiacyjnych. Wkład do Z_{eff} pochodził głównie od lekkich jonów, np. Be oraz od Ni. Badaniem tym wykazaliśmy także, że możliwą przyczyną akumulacji wolframu w centralnej części plazmy podczas fazy ICRH jest zwiększona koncentracja wolframu w plazmie brzegowej.

4.3.2.3 Wpływ dodatkowego grzania w reżimie wysokiego utrzymywania plazmy (ang. H-mode)

W układzie JET-ILW grzanie ICRH było podstawowym narzędziem przy opracowywaniu scenariuszy w wariacie z tzw. efektywnym trybem wyładowania i utrzymywania plazmy, nazywanego też modem H (ang. H-mode). Rola łączonego grzania ICRH i NBI pod kątem

zdolność do ekranowania ciężkich zanieczyszczeń w rdzeniu plazmy jest przedstawiona w pracach [A9], [A6], [C11], [B8]. W wyładowaniach z grzaniem NBI + ICRH osiągnano wyższą centralną temperaturę elektronową $T_e(0)$, niż w przypadku wyładowań z samym NBI. $T_e(0)$ wzrastała liniowo wraz z mocą grzania ICRH. Centralna gęstość elektronowa $n_e(0)$, ulegała zmniejszeniu po zastosowaniu grzania ICRH. Promieniowanie plazmy było w tym przypadku większe, co odzwierciedlało dodatkowe źródła zanieczyszczeń wywołane efektem *RF-sheath*. Jednakże, w wyładowaniach z samym grzaniem NBI występowała silna akumulacja zanieczyszczeń w rdzeniu plazmy. Do różnej koncentracji zanieczyszczeń mogą prowadzić tzw. efekty neoklasyczne, procesy turbulencyjne i makroskopijne zdarzenia transportowe, takie jak mody brzegowe ELM (ang. *Edge Localized Modes*), lub niestabilności magnetohydrodynamiczne typu *sawteeth*. Wpływ grzania ICRH na transport zanieczyszczeń zilustrowałam pod kątem korelacji między nachyleniem profilu koncentracji zanieczyszczeń (ang. *impurity peaking* – zdefiniowanym stosunkiem wartości koncentracji w rdzeniu plazmy do koncentracji odległej od środka sznura plazmowego), a nachyleniem profilu gęstości i temperatury elektronowej. Nachylenie temperatury elektronowej rosło wraz ze wzrostem mocy ICRH i odzwierciedlało głównie wzrost temperatury centralnej $T_e(0)$. Nachylenie gęstości elektronowej malało w wyładowaniach z NBI + ICRH. W odróżnieniu od przypadków z samym grzaniem NBI nachylenie zanieczyszczeń malało wraz ze wzrostem nachylenia temperatury elektronowej. Dla mocy $P_{ICRH} > 4$ MW osiągało wartości około 2,5 raza mniejsze, niż w przypadku samego grzania NBI. Okazało się, że efekty neoklasyczne odgrywały dominującą rolę w transporcie zanieczyszczeń w pobliżu rdzenia plazmy. Zaobserwowano tam wzrost konwekcji neoklasycznej w kierunku zewnętrznym, spowodowanej wzrostem nachylenia temperatury elektronowej i spłaszczeniem profilu gęstości. W przypadku małych gęstości ($n_e < 1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$) korelacja między nachyleniem temperatury a ekranowaniem zanieczyszczeń, odzwierciedlała zarówno efekt nachylenia temperatury jonowej, jak i efekty ciśnienia szybkich jonów. Stwierdziliśmy, że indukowane gradienty ciśnienia mogą powodować ekranowanie zanieczyszczeń, a to z powodu zderzeń między przyspieszonymi jonami i ciężkimi zanieczyszczeniami. Anizotropowy rozkład szybkich jonów może zmniejszyć poloidalną asymetrię zanieczyszczeń, spowodowaną przez rotację plazmy. Grzanie ICRH zostało wykorzystane do optymalizacji scenariuszy plazmy o dużej wydajności - tzw. scenariusza podstawowego (ang. *baseline scenario*) oraz scenariusza hybrydowego (ang. *hybrid scenario*). Celem jest uzyskanie około 15 MW maksymalnej mocy syntezy termojądrowej w nadchodzącej kampanii eksperymentalnej z plazmą deuterowo-trytową (DT) w tokamaku JET (DTE2). Konieczne jest przy tym zachowanie stabilnej fazy w modzie-H przez około 5 sekund. Kontrola

zanieczyszczeń w plazmie centralnej ma, zatem duże znaczenie dla wydłużenia fazy dużej wydajności w plazmie DT. Promieniowanie wolframu z plazmy grzanej ICRH analizowałam dla dużej bazy danych w układzie JET, obejmującej scenariusz podstawowy z prądem plazmy w zakresie $I_p = 2,5-4$ MA (przy $B_T = 2,7-3,8$ T) oraz scenariusz hybrydowy z prądem plazmy $I_p = 2,5$ MA (przy $B_T = 2,9$ T) [A6]. W scenariuszu podstawowym przy średnim natężeniu prądu plazmy ($I_p = 2,5$ MA), kiedy moc grzania ICRH została zwiększona do 6 MW zaobserwowałam silny spadek promieniowania jonów wolframu w rdzeniu plazmy. Zgodnie z przewidywaniami teorii neoklasycznej, nachylenie profilu wolframu ewoluowało. W przeprowadzonych badaniach wyraźnie zaobserwowałam korzystny wpływ grzania ICRH na gradienty T_e i n_e oraz odwrócony znak konwekcji: od wewnątrz do zewnątrz dla mocy ICRH przekraczającej 3 MW. Przy wyższym prądzie plazmy ($I_p = 3-4$ MA) potrzebne było 5 MW mocy grzania ICRH, aby uniknąć akumulacji wolframu w centrum plazmy. W przypadku wyładowań hybrydowych, z mocą grzania ICRH w zakresie 4-5 MW, silna akumulacja wolframu występowała tylko w początkowej fazie wyładowania. Było to skorelowane z dużym nachyleniem profilu gęstości elektronowej. Gdy to początkowe nachylenie profilu gęstości zostało zmniejszone, obserwowałam małą koncentrację wolframu w plazmie centralnej.

4.3.2.4 Wpływ ewaporacji berylu

W drodze ewaporacji naniesiono na ścianę tokamaka JET cienką (~ 3 nm) warstwę berylu. Porównując wyładowania przed ewaporacją i po ewaporacji, zaobserwowałam silny spadek mocy promieniowania oraz poziomu koncentracji wolframu i niklu w plazmie. Wyniki zostały opisane w pracach [A12], [B36]. Powierzchnie wolframowe i niklowe w głównej komorze próżniowej zostały na skutek osadzenia się warstwy berylu ekranowane przed sputteringiem. Zasugerowało to, że powierzchnie te są ważnym źródłem zanieczyszczeń w tokamaku JET. Oczekiwano, że warstwa berylu zniknie bardzo szybko (po jednym wyładowaniu) w miejscach mających bezpośredni kontakt z plazmą. Jednak pozytywny wpływ ewaporacji berylu na promieniowanie plazmy był nadal widoczny po ~ 10 wyładowaniach.

4.3.2.5 Wpływ gęstości brzegowej

Badania eksperymentalne wykazały, że gęstość brzegowa plazmy wpływa na zachowanie zanieczyszczeń. Większa gęstość brzegowa w modzie-L była związana z iniekcją gazu D_2 do układu. Poziom wolframu w tokamaku JET-ILW został obniżony w wyniku pracy z większą gęstością brzegową [A17], [A12]. Podobną zależność od gęstości plazmy brzegowej

zaobserwowałam dla zanieczyszczenia niklu [A15]. Tak znaczny spadek koncentracji zanieczyszczeń o wysokim Z może być wynikiem szeregu procesów, które zachodzą podczas wzrostu gęstości:

- zmniejszenie źródła zanieczyszczeń przy wyższej gęstości, częściowo z powodu spadku koncentracji lekkich zanieczyszczeń odpowiedzialnych za proces sputteringu i z powodu obniżonej temperatury elektronowej w SOL (ang. *Scrape-Off Layer*). SOL jest to wąski obszar plazmy o szerokości kilku cm między separatryszą a ścianą, gdzie linie pola magnetycznego są otwarte. W urządzeniach typu tokamak cząstki utrzymywane są w pewnej objętości utworzonej przez zamknięte linie pola magnetycznego. Granica obszaru utrzymywania plazmy jest nazywana separatryszą,
- zmiana właściwości transportu w centrum plazmy degradująca proces utrzymywania zanieczyszczeń,
- bezpośrednie rozcieńczanie zanieczyszczeń plazmy,
- w przypadku grzania ICRH, redukcja pola elektrycznego wytwarzanego wokół anten przy wyższych gęstościach w SOL.

Postępy w diagnostyce plazmy brzegowej i sposoby modelowania wpływu ICRH na SOL i PWI zostały dodatkowo omówione w pracy [B3].

4.3.2.6 Wpływ iniekcji paliwa deuterowego

W tokamaku JET-ILW opracowaliśmy technikę napszczania gazu deuterowego D_2 , która umożliwiła:

- zoptymalizowanie mocy grzania ICRH, która może być dostarczana w wyładowaniach w modzie-H,
- redukcję koncentracji zanieczyszczeń o wysokim Z [A9], [A2], [B33].

Badanie to było częścią szerszych działań na różnych tokamakach, które koncentrują się na optymalizacji ICRH dla układu ITER i przyszłych urządzeń termojądrowych. Okazało się, że w przypadku zbyt małej ilości gazu D_2 , plazma w modzie-H w obecności ściany ILW w tokamaku JET jest podatna na akumulację wolframu. Zostały przeprowadzone specjalne eksperymenty, w których profile gęstości elektronowej w SOL były modyfikowane poprzez wstrzykiwanie gazu D_2 z różnych miejsc na toroidalnej komorze tokamaka. Zastosowano moduły iniekcji gazu (GIM) z obszarów środkowej płaszczyzny i góry komory tokamaka oraz z obszaru dywertora. Napszczanie gazu w obszarze dywertora prowadziło do najgorszej

wydajności grzania, i to niezależnie od ilości gazu. W przypadku iniekcji paliwa w środkowej płaszczyźnie tokamaka, gęstość w obszarze SOL oraz sprzężenie fali RF z plazmą (ang. *coupling*) były znacznie większe. Efekt był silniejszy dla anten położonych bliżej modułu wtrysku gazu. Iniekcja z góry komory tokamaka miała nieco mniejszy wpływ, ale w podobny sposób oddziaływała na wszystkie anteny, ponieważ miało miejsce toroidalnie jednorodne, a nie lokalne zwiększenie gęstości w SOL. Poprzez zastosowanie kombinacji iniekcji gazu z GIM-ów z góry tokamaka i ze środkowej płaszczyzny, udało się zoptymalizować sprzężenie fal elektromagnetycznych z wszystkich anten ICRH. Przy umiarkowanej ilości wstrzykiwanego gazu ($\sim 1,2 \times 10^{22}$ e/s), do 6 MW mocy grzania udało się dostarczyć do plazmy w modzie-H. Promieniowanie plazmy, jak również poziom zanieczyszczeń wolframu i niklu malały wraz ze wzrostem ilości gazu we wszystkich przypadkach. Wstrzykiwanie gazu z obszaru płaszczyzny środkowej było najkorzystniejsze z punktu widzenia redukcji zanieczyszczeń indukowanych przez ICRH. Największą zawartość zanieczyszczeń obserwowałam przy iniekcji paliwa z obszaru dywertora. W celu wpłynięcia na energię jonów docierających do ściany wymagana jest minimalna ilość wstrzykiwanego gazu ($\sim 6 \times 10^{21}$ e/s). Podobny efekt obserwowałam w tokamaku ASDEX-Upgrade, kiedy zastosowano iniekcję deuteru w okolicach anteny RF [C32]. Zwiększona ilość napuszczanego deuteru prowadziła do redukcji źródła wolframu w plazmie brzegowej i jego koncentracji w plazmie centralnej [A10], [A16]. Najprawdopodobniej istotną rolę w redukcji zanieczyszczeń spełnia lokalne chłodzenie plazmy w SOL i zwiększona gęstość elektronowa blisko anten ICRH spowodowane zwiększoną ilością gazu. Wzbudzone pole elektryczne wokół anten jest redukowane, co prowadzi do słabszego przyspieszenia jonów w SOL i redukcji sputteringu. Wreszcie, w przypadku iniekcji gazu z płaszczyzny środkowej, zaobserwowano nieco większe częstotliwości modów brzegowych (ELM), co również przyczynia się do obniżenia poziomu zanieczyszczeń.

4.3.2.7 Wpływ częstotliwości ELM

Specjalną uwagę zwróciłam na kwestie związane z kontrolą zanieczyszczeń podczas fazy końcowej modu-H [A3]. Z dotychczasowych eksperymentów wiadomo mi było, że kiedy dodatkowa moc grzania ulega zmniejszeniu, a plazma przechodzi z wysokiego (H) do niskiego (L) reżimu utrzymywania, powstają długie okresy bez produkowania modów brzegowych ELM (ang. *Edge Localized Modes*). Sytuacja ta prowadzi do akumulacji wolframu, co może spowodować kolaps radiacyjny wyładowania lub ewentualnie zerwanie sznura plazmowego. Faza ta, problematyczna w środowisku JET-ILW, będzie ważnym aspektem działania ITER-a,

ponieważ jego konstrukcja pozwala tylko na niewielką liczbę nagłych zerwań sznura plazmowego. Aby utrzymać stacjonarne warunki w modzie-H bez akumulacji zanieczyszczeń, częstotliwość ELM-ów musi być kontrolowana. Można to osiągnąć stosując metody stymulacji ELM-ów za pomocą iniekcji gazu D_2 , ang. „*vertical kicks*” lub wstrzykiwaniu granulek zamrożonego paliwa deuterowego (ang. *pellets*). Wyzwalanie dodatkowych ELM-ów poprzez „*vertical kicks*” jest nowoopracowaną w JET-ILW metodą, która opiera się na szybkich ($\sim 2-3$ ms), pionowych ruchach plazmy. Wzrost częstości ELM-ów efektywnie redukuje produkcję wolframu i jego strumień z do obszaru centralnego. Stanowi to pierwszy krok do uniknięcia wzrostu promieniowania plazmy. Zanieczyszczenia są wypychane na zewnątrz przez ELM-y, podczas gdy pomiędzy kolejnymi ELM-ami są wpychane do środka plazmy. W wyniku napuszczania gazu częstotliwość ELM-ów wzrasta [C36]. Przy małej ilości wstrzykiwanego gazu częstotliwość ELM-ów maleje, a całkowite promieniowanie plazmy i koncentracja wolframu w centrum znacząco wzrasta [A6]. Nachylenie profilu wolframu okazało się: dość duże w przypadku małej ilości wstrzykiwanego gazu i: małe w przypadku dużej ilości napuszczanego gazu. Okazało się również, że przy napuszczaniu gazu z górnej części komory próżniowej, osiągnano nieco większe częstości ELM-ów, niż w przypadku napuszczania gazu z obszaru dywertora. Dzięki jednoczesnemu zastosowaniu iniekcji gazu i granulek z zamrożonym paliwem D do stymulacji ELM-ów, udało się zapobiec akumulacji zanieczyszczeń [B1]. Utrzymywanie plazmy było lepsze niż w przypadku samego wtrysku gazu. Wstrzykiwanie granulek z paliwem powodowało, że charakter ELM-ów zmieniał się radykalnie z regularnych ELM-ów o dobrze zdefiniowanej częstotliwości na bardziej nieregularne ELM-y o charakterze złożonym i bez jasno zdefiniowanej częstotliwości.

4.3.2.8 Wpływ formowania gorących obszarów (ang. *hot-spots*) w obszarze limitera

Z powodu podwyższonych przepływów ciepła podczas grzania ICRH lub NBI w tokamaku JET-ILW, na berylowym limiterze i na pionowych ogranicznikach anten ICRH, tworzą się lokalne gorące punkty nazywane (ang. *hot-spots*). Muszą być one monitorowane, w szczególności pod kątem ITER-a, gdzie obciążenia cieplne na antenach ICRH i sąsiadujących modułach nie mogą być większe niż 5 MW/m^2 . Wyładowania hybrydowe przeprowadzane w JET-ILW były jedynymi, które z powodu tworzenia się hot-spotów na limiterze zostały zatrzymane przez pracujący w czasie rzeczywistym system ochrony ściany [A1]. Równoczesna kontrola temperatury gorących punktów i koncentracji zanieczyszczeń w plazmie centralnej była kluczowa, a to ze względu na fakt, że ten sam mechanizm oddziaływania plazma-ściana był odpowiedzialny za powstawanie hot-spotów i za rozpylanie zanieczyszczeń. Stwierdzono,

że lokalna iniekcja gazu D_2 łagodzi gorące punkty i pozwala na wyładowania o akceptowalnej temperaturze komponentów ściany. Stwierdziłam, że na temperaturę gorących obszarów i na koncentrację zanieczyszczeń w centrum plazmy mają wpływ: ilość gazu, prąd plazmy, gęstość na separatrysie. Temperatura gorących punktów i koncentracja zanieczyszczeń malała wraz z ilością napuszczanego gazu. Zmiana prądu plazmy miała silny wpływ na oddziaływanie plazma-ściana. Było to spowodowane tym, że podczas zmian prądu plazmy, modyfikacji ulegała gęstość plazmy na separatrysie. W przypadku mniejszego prądu plazmy powodującego niższą gęstość na separatrysie, temperatura hot-spotów i koncentracja zanieczyszczeń była większa, niż przy większym prądzie plazmy. Mechanizm odpowiedzialny za powstawanie hot-spotów był powiązany z szybkimi jonami. Jednym z możliwych wyjaśnień tego zjawiska jest, to, że wiązka szybkich cząstek, która uderza w określony obszar limitera, jest rozpraszana wskutek większych gęstości brzegowych i ciśnienia neutralów. To powoduje, że szybkie jony mają większe prawdopodobieństwo zderzenia się z jonami lub neutralami przed uderzeniem w ścianę, co jest zjawiskiem pożądanym z perspektywy ograniczenia zanieczyszczeń.

4.3.2.9 Wpływ położenia warstwy rezonansowej jonów cyklotronowych

W magnetycznie utrzymywanej plazmie jony i elektrony rotują wokół linii pola magnetycznego z częstościami, które zależą od ich masy, ładunku oraz wartości pola magnetycznego. W tokamaku pole magnetyczne maleje wraz z odległością od środka sznura plazmowego. Dlatego też są określone miejsca, gdzie dochodzi do rezonansu fal radiowych z jonami lub elektronami. Pozwala to na grzanie ściśle określonych obszarów w plazmie. Dla określonych parametrów plazmy (temperatura, gęstość, pole magnetyczne itp.), grzanie ICRH może być zoptymalizowane poprzez precyzyjne dostrojenie położenia warstwy rezonansowej (IC). Dla danej częstotliwości radiowej można to zrobić poprzez regulację pola toroidalnego przy stałym prądzie plazmy, albo regulację pola toroidalnego i prądu plazmy przy stałym współczynniku bezpieczeństwa (q_{95}). Zaobserwowałam korzystny wpływ zastosowania centralnego grzania ICRH na omawiane zjawisko [A9], [A6]. Nachylenie profilu temperatury elektronowej wzrosło, a promieniowanie z plazmy i koncentracja zanieczyszczeń z w plazmie centralnej zmalały, gdy warstwa IC znajdowała się w odległości ± 10 cm od magnetycznego środka plazmy. Efekt ten był powiązany ze zwiększoną konwekcją neoklasyczną, spowodowaną wzrostem nachylenia profilu temperatury. Efekty związane z szybkimi jonami odgrywały również ważną rolę w skutecznym ekranowaniu zanieczyszczeń. Wartości centralnej temperatury elektronów, a w szczególności koncentracja zanieczyszczeń w rdzeniu, była do

pewnego stopnia zniekształcona przez dynamikę niestabilności magnetohydrodynamicznych typu sawteeth, na które wpływ miało położenie rezonansu IC.

4.3.2.10 Wpływ fazy anteny ICRH

Systematycznie identyfikowałam najlepsze warunki operacyjne dla minimalizacji oddziaływania plazmy ze ścianą podczas grzania ICRH w układzie JET-ILW. Przeprowadzone badania sugerowały, że zarówno parametry anteny ICRH (faza, napięcie itp.), jak i właściwości plazmy w SOL (iniekcja gazu, odległość między anteną a plazmą, itp.), mogą mieć duży wpływ na przebieg zjawiska RF-*sheath* w SOL. Oczekuje się, że różne fazy anteny mogą generować różne pole elektryczne E_{\parallel} równoległe do pola magnetycznego. Przeprowadziliśmy eksperymenty poświęcone zmianom fazy anteny, w trakcie, których dokonałam szeregu istotnych obserwacji. W eksperymentach opisanych w [A15] testowaliśmy fazę dipolową (0π i -90° ($0 -\pi/2 -\pi -\pi -3\pi/2$) w plazmie deuterowej w modzie-L, ze zmiennym prądem plazmy (od 1,4 MA do 2,4 MA) i odległością między separatryszą a anteną (od 3 do 7 cm). Mniejsza odległość oznaczała, że szybsze jony uderzają w zewnętrzną ścianę, co prowadzi do rozpylania jonów i większej zawartości zanieczyszczeń w rdzeniu. W przypadku fazy -90° , oddziaływanie plazma-ściana było wzmocnione w porównaniu z fazą dipolową. Obserwowałam wyższą koncentrację jonów wolframu i niklu w plazmie centralnej oraz większą emisję promieniowania jonów wolframu z obszaru dywertora [A17]. W tym przypadku obserwowałam małą zależność od prądu plazmy. W czasie działania różnych anten grzania ICRH w tokamaku JET (C lub D lub A+B) zaobserwowałam różne koncentracje zanieczyszczeń. Było to spowodowane różnicami w dalekim i bliskim polu elektrycznym wytwarzanym wokół anten lub innym połączeniem anten ze ścianą za pomocą linii pola magnetycznego. Podczas fazy -90° zaobserwowaliśmy zwiększone obciążenia cieplne [B36] oraz zwiększone rozpylenie berylu [B39] na komponentach anten. Wpływ fazy dipolowej -90° badałam także w modzie-H [A9], wykazując, że pomimo podobnej mocy grzania ICRH i podobnych właściwości plazmy centralnej, całkowita moc promieniowania, a także poziom niklu i wolframu były znacznie wyższe przy zastosowaniu fazy -90° . Wynik obserwacji ukazujący, że oddziaływania plazmy ze ścianą wywołane przez grzanie ICRH jest silniejsze, gdy wzbudzone są fale o mniejszej wartości wektora falowego k_{\parallel} , jest zgodny z przewidywaniami teoretycznymi i został szczegółowo udokumentowany również w eksperymentach ze ścianą węglową [B44]. Dla niższych wartości wektora falowego k_{\parallel} oczekiwano mniejszej wydajności grzania przy danej temperaturze plazmy, co również częściowo mogło przyczynić się do zwiększonego poziomu promieniowania obserwowanego w badanym przypadku.

4.3.2.11 Wpływ konstrukcji anteny ICRH

Tokamak ASDEX Upgrade posiada system ICRH złożony z czterech anten, nazywanych a1, a2, a3 i a4. Pierwsze ograniczenia operacyjne związane z uwalnianiem wolframu podczas stosowania grzania ICRH pojawiły się po zainstalowaniu limitera anteny pokrytego powłoką wolframową. Przeprowadzone wtedy badania wykazały, że limiter anteny ICRH odgrywa dominującą rolę, jako źródło wolframu. Zaobserwowano dwukrotny wzrost koncentracji wolframu. Przed kampanią eksperymentalną w 2011 roku, antena a4 została zmodyfikowana poprzez zainstalowanie szerszego limitera wolframowego. Aby zwiększyć okno operacyjne grzania ICRH, limityery anten a1 i a2 zostały pokryte 50 μm warstwą boru (B). Obie anteny z powłoką borową zostały skonfigurowane, jako jedna para, natomiast anteny z powłoką wolframową zostały połączone, jako druga para. Pozwoliło to na niezależne działanie anten z powłoką borową oraz anten z powłoką wolframową. Analizy statystyczne wykazały wyraźny spadek koncentracji wolframu po zastosowaniu anten z powłoką borową [A11]. Zastosowanie limiterów antenowych z powłoką borową nie rozwiązało ogólnego problemu oddziaływań plazma-ściana związanych z ICRH, ale pomogło zwiększyć moc grzania i przeprowadzić istotne dla ITER-a eksperymenty w ASDEX-Upgrade ze ścianą wolframową. Dwie nowo zainstalowane w 2015 r. 3-częściowe (ang. 3-strap) anteny w tokamaku ASDEX-Upgrade zostały specjalnie zaprojektowane w celu zmniejszenia pola elektrycznego wytwarzanego wokół limitera anten, a tym samym w celu zmniejszenia sputteringu wolframu. Porównując anteny 2-częściowe powlekane borem z antenami 3-częściowymi powlekanymi wolframem wykazałam, że nowe anteny charakteryzuje się znaczną redukcją koncentracji wolframu w plazmie, co jest zgodne z redukcją źródła wolframu [A8], [A2], [B3]. Tzw. ITER-like antena (ILA) w JET nie była zaprojektowana w celu zmniejszenia produkcji zanieczyszczeń, ale ma duży wpływ na ich zawartość. Zarówno po lewej, jak i po prawej stronie, antena ILA jest otoczona dużymi komponentami równoległymi do pola magnetycznego, co powoduje zmniejszenie wytwarzanego pola E_{\parallel} . Porównanie promieniowania plazmy oraz koncentracji jonów wolframu i niklu podczas działania starej anteny A2 w JET-ILW z anteną ILA przedstawiłam w pracach [A8] i [C12], porównanie statystyczne, zaś w pracy [A3]. Podczas działania anteny ILA obserwowałam mniejsze promieniowanie plazmy i mniejszą koncentrację wolframu.

4.3.2.12 Wpływ scenariusza grzania ICRH i koncentracji jonów mniejszościowych

ICRH wydaje się mieć duży potencjał w zakresie grzania plazmy w przyszłych urządzeniach termojądrowych, takich jak ITER. Z tego też powodu program eksperymentalny w JET skoncentrowany był również na rozwoju różnych scenariuszy grzania ICRH, które mogą być wykorzystane w ITER. ITER w początkowej fazie działania będzie pracował z plazmą wodorową (H) lub helową (^4He) w reżimie niskiego utrzymywania plazmy (L-mod), przy połowie nominalnego toroidalnego pola magnetycznego $B_T=2,65$ T, i prądzie plazmy $I_p=7,5$ MA. Plazmę w JET-ILW z ogrzewaniem ICRH scharakteryzowaliśmy z punktu widzenia wydajności cieplnej (wzrost centralnej temperatury elektronów, całkowita energia plazmy) oraz wpływu centralnego ogrzewania na transport zanieczyszczeń o wysokiej zawartości jonów o dużej liczbie atomowej Z. Antena ICRH w ITER-ze ma dostarczyć do 20 MW mocy grzania w zakresie częstotliwości 40-55 MHz. W plazmie wodorowej w ITER-ze i dla zaprojektowanego zakresu częstotliwości, do centralnego grzania jonów możliwe jest zastosowanie tylko pierwszej harmonicznej ($N=1$) częstotliwości jonów wodoru ($f \approx 40$ MHz) i drugiej harmonicznej ($N = 2$) obecnych w plazmie wodorowej mniejszościowych jonów helu-3 (^3He) ($f \approx 53$ MHz). ^3He będzie również odgrywać ważną rolę w aktywacyjnej fazie ITER w pełnym zakresie pola magnetycznego $B_T=5,3$ T, poprzez zastosowanie pierwszej harmonicznej jonów mniejszościowych ^3He .

4.3.2.12.1 Scenariusze grzania ICRH falą elektromagnetyczną o częstotliwości odpowiadającej pierwszej harmonicznej częstotliwości większościowych jonów wodoru ($N = 1$ H) i drugiej harmonicznej częstotliwości mniejszościowych jonów helu-3 ($N = 2$ ^3He) w plazmie wodorowej

Parametry grzania ICRH dla początkowej fazy w ITER były ściśle odtworzone w eksperymentach, które przeprowadziliśmy na tokamaku JET [A19], [A2]. Dla scenariusza $N=1$ H wydajność grzania zdefiniowana, jako stosunek mocy zaabsorbowanej przez plazmę do mocy grzania dostarczonej do układu, mieściła się w zakresie $\eta = P_{\text{abs}}/P_{\text{RF}} = 0,3-0,4$, co wskazuje, że nie był to bardzo efektywny scenariusz grzania. Było to związane ze stosunkowo wysokimi stratami radiacyjnymi spowodowanymi zwiększoną interakcją plazmy ze ścianą. Około 1/4 mocy grzania ICRH została utracona przez promieniowanie. Czas utrzymywania plazmy był krótszy około dwa razy. Zarówno temperatura elektronowa, jak i jonowa rosła liniowo wraz z mocą grzania ICRH. Scenariusz z drugą harmoniczną ($N = 2$) jonów ^3He wykazał również niską wydajność grzania i zwiększoną interakcją plazmy ze ścianą. Wydajność grzania wahała się od $\eta = 0,1$ (przy małych koncentracjach ^3He w plazmie) do $\eta = 0,4$, gdy koncentracja ^3He była

powyżej 20 %. Energia plazmy, jak również jonowa i elektronowa temperatura osiągnięta przy tej samej mocy wejściowej wzrosła, gdy większa frakcja ^3He była obecna w plazmie. Przy dużych koncentracjach ^3He temperatura jonowa przekroczyła temperaturę elektronową. Przy małych koncentracjach ^3He wyładowania były w pełni zdominowane przez grzanie elektronów. Czas utrzymywania energii został obniżony dwukrotnie. Połowa zastosowanej mocy RF została utracona w wyniku promieniowania. Moc promieniowania w funkcji koncentracji ^3He wykazywała maksimum przy koncentracji $X[^3\text{He}] = 15\%$ (X oznacza symbol koncentracji). Spadek mocy promieniowania obserwowany dla $X[^3\text{He}] > 15\%$ był związany z poprawą wydajności grzania obserwowaną przy wyższych koncentracjach $X[^3\text{He}]$, co mogło prowadzić do zmniejszenia mocy RF, odpowiedzialnej za oddziaływanie plazma-ściana. Również w tym scenariuszu zarówno temperatura elektronowa, jak i jonowa wykazały liniowy wzrost z mocą grzania. Oba badane scenariusze wyraźnie różniły się koncentracją zanieczyszczeń w plazmie. Przy tej samej mocy wejściowej grzania, moc promieniowania plazmy, efektywny ładunek plazmy Z_{eff} były większe w przypadku scenariusza $N = 2\ ^3\text{He}$, niż w przypadku scenariusza $N = 1\ \text{H}$. Większe wartości Z_{eff} obserwowane w tych eksperymentach wynikały nie tylko z obecności jonów ^3He w plazmie, ale także z większej koncentracji metalicznych zanieczyszczeń. Wzmocniona interakcja plazmy ze ścianą była spowodowana głównie nierezonansowym przyspieszeniem cząsteczek naładowanych w warstwie SOL (efekt *RF-sheat*) oraz bezpośrednim sputteringiem materiału ściennego przez szybkie jony. Procesy transportowe w obu scenariuszach były również odmienne, co prowadziło do różnych profili gęstości i temperatury. Dwa scenariusze ogrzewania wykorzystują różne częstotliwości radiowe, co prowadzi do innego oddziaływania plazmy ze ścianą, a tym samym do różnych strat w wyniku promieniowania. Straty mocy w plazmie, definiowane, jako różnica pomiędzy mocą wejściową a stratami na promieniowanie, stanowią wszystkie inne straty, które są związane głównie z procesami transportu energii i cząstek. W wyładowaniach ze scenariuszem $N = 1\ \text{H}$ większość zastosowanej mocy grzania została utracona przez transport ($\sim 70\%$), a straty w wyniku promieniowania stanowią jedynie niewielką część ogólnego bilansu energetycznego. W scenariuszu $N = 2\ ^3\text{He}$, straty radiacyjne, jak i straty transportowe równoważyły się. Ze względu na to, że straty transportowe w centrum plazmy rosły szybciej wraz z mocą grzania ICRH w eksperymencie z $N = 1\ \text{H}$, to wzrost centralnej temperatury był wolniejszy, niż w przypadku eksperymentu z ^3He , gdzie dominowały brzegowe straty radiacyjne.

4.3.2.12.2 Scenariusz grzania ICRH pierwszą harmoniczną częstotliwością fali elektromagnetycznej i mniejszościowych jonów wodoru ($N=1$ H) w plazmie deuterowej w modzie-L

W przypadku plazmy ^4He w tokamaku ITER zostanie zastosowany scenariusz z pierwszą harmoniczną mniejszościowych jonów wodoru ($N=1$ H), odpowiadający częstotliwości rezonansowej $f = 42$ MHz. Ze względu na fakt, że jony D i ^4He mają taki sam stosunek ładunku do masy, scenariusz $N=1$ H testowaliśmy w plazmie deuterowej w układzie JET-ILW [A13]. Scenariusz ten jest najczęściej stosowany we współczesnych maszynach eksperymentalnych. Ma ogólnie dużą wydajność grzania (ok. 80%). Moc fali pochłaniana przez mniejszościowe jony wodorowe może być kierowana do podgrzewania elektronów lub jonów w centrum plazmy. W plazmie deuterowej grzanie jonów wspomaga reaktywność syntezy jądrowej, podczas, gdy centralne grzanie elektronów może być ważne dla utrzymania małej zawartości zanieczyszczeń. Badania plazmy w reżimie L wykazały, że zawartość zanieczyszczeń indukowanych przez ICRH może silnie zależeć od koncentracji mniejszościowych jonów wodoru. Donoszą o tym [A12], [C28], [C27], [B36]. W związku z tym w pracy [A13] dokładniej zbadano taką zależność. Podczas zwiększania koncentracji wodoru ($X[\text{H}]$ %) w plazmie do 30 %, wydajność grzania uległa pogorszeniu z ~ 80 % przy niskich i średnich koncentracjach wodoru do, około 40 %, gdy $X[\text{H}] = 30$ %. Całkowite promieniowanie nie było bardzo wrażliwe na koncentrację wodoru, ale zaobserwowałam spadek promieniowania w obszarze limitera, któremu towarzyszył spadek zawartości wolframu, niklu oraz strumienia berylu, z minimum przy $X[\text{H}] = 20$ %. Koncentracja zanieczyszczeń i moc promieniowania ponownie wzrosły, gdy frakcja wodoru wzrosła powyżej 20 %. Było to spowodowane silnym spadkiem wydajności grzania. Niestety, właściwości brzegowe plazmy również uległy zmianie w czasie zmian koncentracji $X[\text{H}]$, co utrudnia stwierdzenie, czy niższy poziom zanieczyszczeń obserwowany przy umiarkowanym poziomie wodoru był związany z plazmą centralną (absorbpcją fali), czy też z efektami brzegowymi (oddziaływanie plazma-ściana). Iniekcja gazu w celu zwiększenia koncentracji wodoru prowadziła do zwiększenia gęstości brzegowej i zmniejszenia koncentracji zanieczyszczeń. Duża część mocy grzania (60-70 %) została utracona w wyniku strat radiacyjnych, podczas gdy w tych samych warunkach ze ścianą węglową strata wynosiła 30-40 %. Było to spowodowane dodatkowym strumieniem wolframu na skutek efektu RF-*sheath*. Przy niskich koncentracjach $X[\text{H}]$ obserwowaliśmy w centralnej plazmie niestabilności MHD typu *sawteeth*, natomiast przy wyższych koncentracjach $X[\text{H}]$ niestabilności te były nieznaczne. Wpływ niestabilności MHD na zanieczyszczenia opisany jest

w rozdziale 4.3.2.13. Ogromna ilość energii, która została przeniesiona z rdzenia do zewnętrznych obszarów plazmy na skutek niestabilności typu sawtooth, przyczyniła się pośrednio do nasilenia sputteringu. Przy wyższych koncentracjach wodoru populacja szybkich cząstek została silnie zredukowana. Symulacje numeryczne wykazują, że w przypadku ITER-a spadek populacji cząstek szybkich może być jeszcze wyższy. Może to mieć wpływ na osiągnięte centralne temperatury elektronowe podczas stosowania grzania ICRH przy dużych koncentracjach wodoru. Dlatego na tym etapie funkcjonowania tokamaka ITER konieczna będzie kontrola zanieczyszczeń o wysokim Z.

4.3.2.12.3 Scenariusz grzania ICRH pierwszą harmoniczną mniejszościowych jonów wodoru (N=1 H) w plazmie deuterowej w modzie-H

Koncentracja jonów mniejszościowych odgrywa także rolę w scenariuszu N=1 H w plazmie w modzie-H [A9]. Wydajność grzania była zależna od koncentracji wodoru, ponieważ wpływa ona na absorpcję fal radiowych w plazmie. Wydajność grzania spadła z ponad 90 % przy niskich koncentracjach wodoru do około 60 % przy $X[H] = 25\%$ i była o 10-20 % wyższa niż to, co zaobserwowaliśmy w plazmie w modzie-L. Główną różnicą było to, że w reżimie H (wyższe gęstości) wydajność grzania pozostawała wysoka przy małych koncentracjach $X[H] < 5\%$. Zarówno energia plazmy, jak i centralna temperatura elektronowa, były zredukowane przy większych koncentracjach $X[H]$, podczas gdy nachylenie profilu zanieczyszczeń wzrosło. Silną stabilizację niestabilności typu *sawteeth* zaobserwowaliśmy przy małej koncentracji wodoru. Różne scenariusze grzania ICRH zostały przetestowane w połączeniu z grzaniem NBI w układzie JET-ILW: grzanie mniejszościowego wodoru, grzanie mniejszościowych jonów ^3He i połączone $\text{H} + ^3\text{He}$ [C19]. Grzanie mniejszościowego wodoru okazało się najbardziej efektywne dla grzania elektronów, a mieszane dla ogólnego grzania plazmy i grzania jonów. Dla $P_{\text{ICRH}} > 4$ MW uzyskano redukcję zanieczyszczeń o dużym Z. Zaobserwowałam podobną koncentrację wolframu w plazmie centralnej dla różnych badanych scenariuszy, ale grzanie mieszane okazało się najbardziej optymalne. Praca przy zbyt niskiej koncentracji $X[^3\text{He}]$ powoduje wyższe koncentracje wolframu ze względu na większe amplitudy pola elektrycznego, co powoduje zazwyczaj zwiększenie oddziaływania plazmy ze ścianą oraz niższe temperatury plazmy.

4.3.2.12.4 Trój-jonowy D-(^3He)-H scenariusz grzania ICRH

W tokamaku JET-ILW testowaliśmy pionierski trój-jonowy D-(³He)-H scenariusz grzania ICRH. Na podkreślenie zasługuje fakt, że wyniki tego eksperymentu zostały opublikowane w czasopiśmie Nature Physics [B11]. Scenariusz trój-jonowy grzania plazmy wymaga, aby do grzania plazmy zastosować częstotliwości w zakresie rezonansu cyklotronowego jonów, których stosunek ładunku (Z) do masy (A) leży pomiędzy dwoma głównymi jonami plazmy $(Z/A)^2 < (Z/A)^3 < (Z/A)^1$. W eksperymentach przeprowadzonych w tokamaku JET stosunek H/(H+D) wahał się między 73-92 %, a koncentracja ³He między 0,1-1,5 %. Zarówno wydajność grzania ICRH, jak i zachowanie zanieczyszczeń zależały od kompozycji plazmy. Okazało się, że niewielka liczba jonów ³He (~ 0,2 %) może skutecznie ogrzewać plazmę dla szerokiego zakresu stosunku H/(H+D). W tym samym czasie zaobserwowałam redukcję metalicznych zanieczyszczeń [A3]. Scenariusz trój-jonowy grzania był bardzo skuteczny dla stabilizacji niestabilności typu *sawteeth*. Okres tych niestabilności zależał od fazy anteny ICRH. Zaobserwowaliśmy dłuższe okresy i wyższe temperatury centralne T_e(0) dla fazy +90 w porównaniu z fazą dipolową. W tym scenariuszu koncentracja wolframu była wyższa w czasie pomiędzy pojawianiem się kolejnych niestabilności typu *sawteeth*, które powodowały zmianę transportu zanieczyszczeń. Scenariusz trój-jonowy grzania plazmy [C8] przy skrajnie małych koncentracjach ³He na tokamaku ASDEX-Upgrade nie wykazywał tak wyraźnej skuteczności, jak w tokamaku JET, a to ze względu na zredukowany czas utrzymywania szybkich jonów z powodu mniejszych wymiarów maszyny i niższego prądu plazmy w układzie ASDEX-Upgrade. Scenariusz trój-jonowy jest bardzo obiecujący w przypadku zastosowania w tokamaku ITER. Jest tak z powodu dostępnych kilku 3-jonowych schematów grzania w tokamaku ITER, które zostały wskazane w pracy [A3].

4.3.2.13 Wpływ aktywności magnetohydrodynamicznych (MHD)

Różne aktywności MHD obserwowaliśmy podczas porównania wyładowań: z grzaniem NBI i ICRH [A16]. Wskaźnikiem niestabilności typu *sawteeth* były zmiany centralnej temperatury elektronowej, która była mierzona za pomocą diagnostyki ECE (*electron cyclotron emission*). Zmiany koncentracji wolframu były skorelowane ze zmianami niestabilności typu *sawteeth*. W wyładowaniach z grzaniem NBI zbocze opadające w niestabilnościach piłokształtnych (ang. *sawtooth crash*) prowadziło do płaskiego lub lekko wklęsłego profilu wolframu. W fazach między zboczami opadającymi dochodziło do monotonicznego wzrostu koncentracji wolframu, która powoli stabilizowała się pod koniec cyklu. Po zastosowaniu grzania ICRH koncentracja wolframu oraz moc promieniowania plazmy wzrosły. Okazało się, że zmiany centralnej

koncentracjach wolframu nie były regulowane wyłącznie niestabilnościami typu *sawteeth*. Zbocze opadające w niestabilnościach piłokształtnych prowadziło do płaskiego profilu wolframu, jednak pomiędzy nimi występowały fazy, gdzie koncentracja wolframu malała. Różnica ta wynikała z faktu, że w przypadku samego grzania NBI, w czasie cyklu piłokształtnego aktywna była niestabilność MHD (1:1), gdzie $m=1$, $n=1$. W wyładowaniach z NBI + ICRH poza tymi niestabilnościami (1:1), pojawiały się także inne aktywności MHD (np. niestabilności typu *fishbones* lub skoki częstotliwości modu (1:1)). Było to skorelowane z fazami, w których koncentracja wolframu malała. Korelacja pomiędzy zmianami MHD, a usuwaniem wolframu z centrum plazmy podtrzymuje hipotezę, że zmiana aktywności MHD jest przyczyną zmian transportu zanieczyszczeń. Wiadomo, że niestabilności typu *fishbones* są napędzane przez szybkie jony generowane podczas grzania ICRH. Korzystny wpływ populacji szybkich jonów można zobaczyć w ewolucji transportu wolframu, podczas cyklu *sawteeth* zaprezentowanego w pracy [A6] i [C2]. Aktywność typu *fishbones* rośnie w amplitudzie, gdy profil promieniowania wolframu ulega spłaszczeniu. Dla najwyższych temperatur plazmy uzyskano dłuższe okresy niestabilności piłokształtnych. Wyładowania bez niestabilności typu *sawteeth* charakteryzowały się niskim promieniowaniem plazmy, małym pikowaniem profilu wolframu oraz znacznym pikowaniem gęstości elektronowej. Wyładowania bez niestabilności piłokształtnych uzyskaliśmy również poprzez zmniejszenie koncentracji mniejszościowej wodoru do około 2 % [C27], [C26]. Analiza wpływu modów NTM (Neoclassical Tearing Modes) na zachowanie wolframu została zamieszczona w pracy [C7].

4.3.2.14 Przejście z reżimu L do reżimu H

W układzie JET-ILW przeprowadziliśmy eksperymenty mające na celu zbadanie wpływu ściany ILW na próg mocy dla przejścia L-H, w szczególności w odniesieniu do zmian w mocy promieniowania i kompozycji zanieczyszczeń [A14]. Badania takie mają znaczenie dla tokamaka ITER, gdzie przejście do reżimu H przewidziane jest przy dużym polu magnetycznym $B_T = 5,4$ T, małej gęstości w trybie L oraz przy ograniczonej mocy dodatkowego grzania. Straty mocy podczas przejścia do reżimu H, P_{thr} , zostały zdefiniowane, jako $P_{thr} = P_{heat} + P_{OH} - dW_{dia}/dt$, gdzie P_{heat} oznacza dodatkową moc grzania (NBI lub ICRH), P_{OH} - moc grzania omowego i dW_{dia}/dt - szybkość zmian energii diamagnetycznej. Wypadkowa moc przechodząca przez separatrycę została zdefiniowana, jako $P_{sep} = P_{thr} - P_{rad,bulk}$, gdzie $P_{rad,bulk}$ oznacza moc promieniowania z plazmy w obszarze limitera. W układzie JET ze ścianą węglową, straty mocy P_{thr} zmieniały się monotonicznie z gęstością plazmy, zgodnie ze skalowaniem ITPA (*International Tokamak Physics Activity*). Po zainstalowaniu ściany ILW

zaobserwowaliśmy minimum gęstości ($n_{e,min}$) dla P_{thr} w funkcji n_e . Gęstość minimalna rosła liniowo z B_T ($n_{e,min} \sim B_T^{4/5}$). Dla gęstości plazmy poniżej $n_{e,min}$, P_{thr} gwałtownie wzrosły w wyładowaniach z grzaniem ICRH. Było to związane z silnym wzrostem mocy promieniowania $P_{rad,bulk}$ i produkcją zanieczyszczeń przy małej gęstości plazmy. Po odjęciu tego promieniowania, wartości P_{thr} dla wyładowań grzanych NBI lub ICRH były podobne przy danej gęstości. Tym samym próg mocy dla przejścia L-H był niezależny od metody grzania w urządzeniu JET-ILW. Niemniej jednak, w tym urządzeniu ze względu na zwiększone promieniowanie z plazmy centralnej wymagana jest większa moc wejściowa grzania ICRH przy przejściu do modu-H niż było to w przypadku stosowania ściany węglowej w tokamaku JET (JET-C). W plazmie centralnej głównie promieniowały jony wolframu i niklu, przy czym promieniowanie wolframu stanowiło około 80 % $P_{rad,bulk}$. Zarówno koncentracja wolframu, jak i niklu silnie wzrosła wraz ze spadkiem gęstości brzegowej, co było równoznaczne z wyższą temperaturą elektronową w plazmie brzegowej i bardziej energetycznymi jonami odpowiedzialnymi za sputtering. W wyładowaniach z ICRH stwierdziłam wyższe koncentracje zanieczyszczeń, niż w przypadku grzania NBI [A15]. W przypadku grzania NBI promieniowanie centralne w reżimie L było podobne w eksperymentach na tokamaku JET zarówno w przypadku stosowania ściany węglowej (JET-C) jak i ściany ILW (JET-ILW). Z_{eff} zostało silnie zredukowane przy przejściu z JET-C do JET-ILW z powodu dużego spadku koncentracji węgla. Największą redukcję Z_{eff} zaobserwowałam dla plazmy o dużej trójkątności, parametru określającego kształt plazmy w przekroju poloidalnym.

4.3.2.15 Wpływ geometrii dywertora i kształtu plazmy

W układzie JET-ILW przeprowadziliśmy również eksperymenty mające na celu zbadanie wpływu czułości progu mocy dla przejścia L-H na zmiany głównego kształtu plazmy i konfiguracji dywertora. Zbadaliśmy pięć różnych konfiguracji magnetycznych (konfiguracje znane w JET, jako HT3L, HT3R, HT3R, HT3R, V5L i V5) [A14], [A15]. Było to możliwe przez zmiany w górnej (δ_U) i dolnej (δ_L) trójkątności plazmy. Eksperymenty wykazały, że zmiana kształtu plazmy oraz konfiguracji dywertora ma istotny wpływ na P_{thr} i na zachowanie zanieczyszczeń. Przy gęstości minimalnej $n_{e,min}$, i stałej górnej trójkątności, moc przechodząca przez separatrycę P_{sep} malała liniowo wraz ze wzrostem δ_L i wzrosła o ok. 25 % przy zwiększaniu górnej trójkątności δ_U , przy zachowaniu stałej konfiguracji dywertora. Również przy ustalonej gęstości docelowej w różnych konfiguracjach plazmy potrzebna była inna moc grzania ICRH, aby osiągnąć mod-H. Koncentracja zanieczyszczeń rosła wraz ze wzrostem trójkątności plazmy i mocy grzania ICRH [C33]. Dla tego samego poziomu mocy grzania NBI,

plazma grzana ICRH charakteryzowała się większą koncentracją zanieczyszczeń. Stwierdzono liniową zależność pomiędzy Z_{eff} i P_{sep} . Wyniki wskazują na możliwą rolę fizyki warstwy SOL przy przejściu L-H, np. poprzez zmiany w recyklingu i/lub przepływie w SOL.

Również w stellaratorach przewiduje się zmiany (np. w czasach utrzymywania cząsteczek i energii), zależne od wyboru konfiguracji pola magnetycznego. Potencjalne zmiany powierzchni strumienia i sił termodynamicznych pochodzących od plazmy centralnej (w szczególności radialnego pola elektrycznego) mogą mieć wpływ na transport zanieczyszczeń. W pracy [A4] zbadalam wpływ zmian konfiguracji magnetycznej w stellaratorze W7-X (wpływ *iota* - liczba przejść linii pola magnetycznego w kierunku poloidalnym przypadająca na jedno przejście w kierunku toroidalnym na powierzchni strumienia toroidalnego) na zachowanie zanieczyszczeń. Konfiguracje te różniły się topologią wewnętrznych wysp magnetycznych. Skan konfiguracji magnetycznej wykonywano poprzez zmiany prądów w cewkach planarnych. Wraz ze wzrostem *iota*, wyspy 5/6 (z poloidalnymi i toroidalnymi numerami modów $m=5$ i $n=6$) przesuwały się do wewnątrz plazmy. Dla różnych konfiguracji nie zaobserwowałam istotnych zmian w koncentracji zanieczyszczeń. Wyraźną różnicę w intensywności linii zanieczyszczeń zaobserwowałam natomiast przy zmianie mocy grzania ECRH (ang. *Electron Cyclotron Resonance Heating*) W przeprowadzonym eksperymencie obserwowano warunki CERC (ang. *Core-Electron-Root-Confinement*), charakteryzujące się profilem temperatury elektronowej T_e , z centralnym maksimum, oraz płaskimi profilami gęstości elektronowej n_e i temperatury jonowej T_i . W warunkach CERC, przy niskich gęstościach plazmy, transport ciepła elektronowego w centrum plazmy maleje, co powoduje, że $T_e \gg T_i$. W plazmie centralnej formowane jest dodatnie, radialne pole elektryczne $E_r > 0$, które ma silny wpływ, zarówno na strumień elektronów, jak i jonów. Duże wartości E_r mogą zmniejszyć jonowe i elektronowe neoklasyczne współczynniki transportu i kierować strumień zanieczyszczeń na zewnątrz. W przeprowadzonym eksperymencie obserwowano jednak wzrost zawartości zanieczyszczeń w centrum plazmy. Może to wskazywać na malejącą dyfuzję wraz ze wzrostem E_r (przy małej kolizyjności zanieczyszczeń) oraz na zmiany w transporcie zanieczyszczeń. Wyniki z pierwszej eksperymentalnej kampanii na stellaratorze W7-X, pokazujące, że jego konstrukcja pola magnetycznego pozwala na dobrą kontrolę prądów plazmy i transportu kolizyjnego zostały przedstawione w artykule opublikowanym w Nature Physics [B7].

4.3.2.16 Wpływ zewnętrznego domieszkowania zanieczyszczeń

W celu uniknięcia miejscowego przegrzania i uszkodzeń dywertora, plazma musi być domieszkowana zewnętrznymi zanieczyszczeniami (ang. *impurity seeding*). W ten sposób

większa część strumienia mocy, która dociera do pierwszej ściany i do płyt dywertora jest zamieniona na promieniowanie. Naturalnie występujące straty promieniowania w układzie JET-ILW, wywołane wyłącznie przez deuter i beryl są zbyt małe ($\sim 25\text{-}30\%$ mocy grzania), w porównaniu do tych w JET- C ($\sim 50\%$), aby chronić dywertor przed obciążeniami o dużej mocy. Ogólną ideą zewnętrznego domieszkowania jest ochłodzenie plazmy w obszarze dywertora poprzez zwiększenie promieniowania w SOL i wokół punktu X (miejsce zerowego pola magnetycznego, gdzie przecina się separatrysa). Jeśli jednak temperatura nie zostanie znacząco obniżona, nowe zanieczyszczenia plazmy mogą prowadzić do sputteringu materiału powierzchni ściany. Efekt zewnętrznego domieszkowania badaliśmy na podstawie obserwacji eksperymentalnych oraz modeli analitycznych w tokamakach JET i ASDEX-Upgrade z myślą o przyszłych wymaganiach w tokamaku ITER. Tylko gazy szlachetne, takie jak krypton (Kr), neon (Ne), argon (Ar) oraz azot (N_2) są brane pod uwagę, jako potencjalne domieszki.

W ASDEX-upgrade skupiłam się głównie na wybranych wyładowaniach z iniekcją samego deuteru D_2 oraz D_2 i domieszek N_2 , Ar i Kr [A10], [A2], [B23]. W celu optymalizacji przestrzennego rozkładu promieniowania zastosowano mieszaninę, co najmniej dwóch domieszek. Zaobserwowałam silny spadek koncentracji wolframu w plazmie wraz ze wzrostem ilości wstrzykiwanego D_2 . Uzyskane wyniki były zgodne z obserwacjami poczynionymi w tokamaku JET [A9]. Redukcja zawartości wolframu przy różnym domieszkowaniu była skorelowana ze wzrostem lokalnej gęstości elektronowej w miejscu emisji jonów wolframu. Centralna temperatura elektronowa utrzymywała się na stałym poziomie. Przy napszczeniu samego gazu D_2 plazma pozostawała czystsza w porównaniu z wyładowaniami z zewnętrznym domieszkowaniem, które prowadziło do wzmocnienia efektywnego sputteringu W (Y_{eff}). Koncentracja wolframu w plazmie centralnej nie była wyraźnie skorelowana z Y_{eff} , czyli ze źródłem zanieczyszczeń. Zatem w tym przypadku efekty transportu miały wpływ na zachowanie wolframu w plazmie. Dla lepszego zilustrowania specyficznych dla ICRH procesów oddziaływania plazmy ze ścianą i różnych charakterystyk anten z powłoką borową i wolframową wybrałam wyładowania z domieszkowaniem N_2 [A10]. Zaobserwowałam, że zarówno przyrost koncentracji wolframu, jak i przyrost mocy promieniowania na 1 MW grzania ICRH zmniejszył się wraz ze wzrostem ilości napszczanego N_2 . Widoczna była dwukrotna różnica w produkcji wolframu pomiędzy antenami z powłoką borową i wolframową. Przeprowadzona analiza potwierdziła dominującą rolę wolframowego limitera anteny, jako źródła zanieczyszczeń.

W tokamaku JET-ILW, w plazmie hybrydowej domieszkowanej N_2 , stacjonarne warunki można było uzyskać tylko wtedy, gdy wystarczająco wcześniej zastosowano grzanie

ICRH [A9], [B26]. W przypadku wyładowań z samym grzaniem NBI, które były domieszkowane plazmy N_2 , obserwowałam stopniową akumulację zanieczyszczeń w plazmie centralnej. W tym samym czasie obserwowałam systematyczny spadek temperatury elektronowej i wzrost centralnej gęstości plazmy. Profil gęstości w centrum plazmy osiągał maksimum, podczas gdy profil temperatury elektronowej był wklęsły. Było to konsekwencją silnego gromadzenia się ciężkich zanieczyszczeń w centrum plazmy. W wyładowaniach z grzaniem ICRH około 5 MW mocy tego grzania było wystarczające do utrzymania stałego nachylenia profilu temperatury i gęstości na poziomie, który był korzystny z punktu widzenia neoklasycznego ekranowania zanieczyszczeń.

W plazmie hybrydowej grzanej NBI, w wyniku zewnętrznego domieszkowania neonem, uzyskano trzykrotny spadek temperatury powierzchni dywertora bez znaczącej degradacji utrzymywania plazmy [C15]. Jednak w tym samym czasie, obserwowałam wzrost mocy promieniowania i efektywnego ładunku Z_{eff} [A5]. Stwierdziłam, że iniekcja neonu z regionu dywertora prowadzi do zwiększenia produkcji wolframu i molibdenu w procesie sputteringu. Warto podkreślić, że molibden znajduje się w wewnętrznych warstwach płyt dywertora, a więc pochodzi z tego samego źródła, co wolfram. Zachowanie tych zanieczyszczeń było również zgodne z rolą ELM-ów, których częstotliwość zmniejszała się wraz ze wzrostem ilości domieszki. W przypadku zanieczyszczeń o średnim Z , takich jak nikiel, przy większej ilości wpuszczanego gazu ich koncentracja malała. Można to wytłumaczyć faktem, że źródło zanieczyszczeń o średnim Z znajduje się poza rejonem dywertora, z którego bezpośrednio napuszczano neon. Większa produkcja niklu w układzie JET jest zwykle skorelowana z grzaniem ICRH, podczas gdy w omawianym eksperymencie stosowano tylko grzanie NBI. Potwierdziłam tym, że zastosowanie tylko grzania NBI może powodować akumulację zanieczyszczeń w wyładowaniach z zewnętrznym domieszkowaniem, co w konsekwencji może prowadzić do radiacyjnego kolapsu plazmy.

Analizowałam też wyładowania w reżimie H domieszkowane neonem, w których zastosowano łączone grzanie NBI+ICRH oraz istotną dla tokamaka ITER dużą trójkąność plazmy. Okazało się, że całkowita moc promieniowania, efektywny ładunek Z_{eff} i stosunek mocy promieniowania w dywertorze do całkowitej mocy promieniowania wzrosły wraz z ilością napuszczanego neonu [B24]. W tym samym czasie obserwowany był spadek temperatury na płytach dywertora i mocy docierającej do płyt. Wraz ze wzrostem ilości neonu, koncentracja wolframu, najpierw wzrosła, a następnie zmalała. Tendencja ta odzwierciedla zależność temperaturową współczynnika *sputteringu* wolframu przez neon. Współczynnik ten jest silnie zredukowany dla temperatury płyty $T_{e, pl} \sim 5$ eV. W przeciwieństwie do ściany

węglowej, iniekcja neonu w tokamaku JET-ILW prowadziła nie tylko do zwiększonego promieniowania w SOL i wokół punktu X, ale także do zwiększonego uwalniania wolframu i zwiększonego promieniowania w plazmie centralnej. Symulacje numeryczne wykazały, że większa, niż eksperymentalna ilość napuszczanego neonu może prowadzić tylko do nieznacznego wzrostu całkowitej mocy promieniowania ze względu na redukcję promieniowania w rdzeniu plazmy (zmniejszona produkcja wolframu), zrekompensowaną wzrostem promieniowania w SOL i wysokim transportem cząstek. Przeanalizowaliśmy również serię wyładowań w układzie JET-ILW z różną ilością neonu oraz paliwa gazowego D₂ [A7]. Stwierdziliśmy, że poziom neonu powinien być modulowany w zależności od poziomu D₂, tak, aby utrzymać Z_{eff} na akceptowalnym poziomie. Nietypowo wysokie Z_{eff} występuje, gdy dla danego poziomu mocy grzania i ilości gazu D₂ ilość napuszczanego neonu przekracza pewien próg. Także w tym przypadku obserwowany był wyraźny wzrost Z_{eff} (wynikający głównie z ilości neonu) i wzrost mocy promieniowania (wynikającej głównie z obecności wolframu). Częstotliwość ELM-ów malała wraz ze wzrostem ilości neonu. W eksperymencie nie zaobserwowano zmian w nachyleniu profilu gęstości zanieczyszczeń i temperatury elektronowej wraz ze spadkiem częstotliwości ELM-ów. Profil gęstości elektronowej był płaski.

Z powodzeniem przeprowadziliśmy również porównanie wyników eksperymentu z symulacjami dla badań z domieszkowaniem azotem (N₂) w tokamaku JET-ILW. W celu zredukowania nadmiernego strumienia ciepła do płyt dywertora w układzie JET przetestowaliśmy iniekcję N₂ dla różnych konfiguracji pola magnetycznego i scenariuszy plazmy [A11]. Uwzględniliśmy dwie klasy wyładowań. Pierwsza z plazmą o dużej trójkątności, z dużym utrzymywaniem i umiarkowaną ilością D₂ oraz N₂. Druga z plazmą o małej trójkątności, z mniejszym utrzymywaniem i większą ilością D₂ oraz N₂. W przypadku plazmy o dużej trójkątności frakcja mocy promieniowania, f_{rad} , była około wartości 0.5 podczas, gdy przy małej trójkątności $f_{\text{rad}} = 0.7$. Tomograficzne rekonstrukcje sygnałów bolometrycznych wykazały, że moc promieniowana wokół punktu X i w rejonie dywertora była większa od mocy promieniowania w obszarze limitera dla wyładowań o małej trójkątności plazmy w porównaniu z wyładowaniami o dużej trójkątności plazmy. Różnice w poziomie ilości D₂ i N₂ implikowały różnice w gęstości w separatrixie $n_{e,\text{sep}}$ (i związanym współczynnikiem recyklingu) i dyfuzji w SOL, (D_{SOL}). W przypadku wyładowań z małą trójkątnością, połączenie większej ilości domieszki, większym $n_{e,\text{sep}}$ i D_{SOL} prowadziło do: wyższego poziomu promieniowania w SOL, wyższej gęstości plazmy w dywertorze i niższej temperatury płyt dywertora. W konsekwencji też powodowało: mniejsze źródła i strumień wolframu, jak również prowadziło do mniejszej

mocy promieniowania i koncentracji wolframu w plazmie centralnej. Pomimo, że koncentracja wolframu była większa w przypadku dużej trójkątności plazmy, Z_{eff} (zdominowane przez azot) było większe w przypadku zmniejszenia trójkątności plazmy. Jak przedstawiliśmy w [B35], silne zmniejszenie współczynnika *sputteringu* prowadzi do umiarkowanego zmniejszenia produkcji wolframu i promieniowania w centrum plazmy. Większa dyfuzja w SOL prowadzi do lepszego ekranowania wolframu i mniejszej koncentracji wolframu w plazmie centralnej oraz do redukcji Z_{eff} . Początkowy wzrost ilości N_2 prowadzi do silnego wzrostu koncentracji wolframu, a co za tym idzie, promieniowania plazmy. Jednak w przypadku wyższych strumieni N_2 produkcja strumienia wolframu spada. Porównując domieszkowanie neonem z domieszkowaniem azotem [B4] zaobserwowaliśmy, że neon prowadzi do nieco większego promieniowania całkowitego niż azot. Jednakże, jest to osiągnięte przy znacznie wyższym zanieczyszczeniu plazmy ($Z_{\text{eff}} \sim 4-5$) w przypadku neonu. Jednocześnie moc przechodząca przez separatrycę jest mniejsza w przypadku domieszkowania neonem niż w przypadku domieszkowania azotem, co wskazuje na lepszą wydajność w reżimie H dla wyładowań z azotem. Również degradacja transportu z domieszką azotu jest mniejsza niż w przypadku neonu, w szczególności w przypadku silnie ogrzewanej plazmy.

Na tokamaku JET-ILW przeprowadziliśmy wiele udanych eksperymentów z wysoką mocą grzania dla scenariusza podstawowego i hybrydowego, w których gęstość plazmy była regulowana za pomocą iniekcji gazu D_2 , albo przez połączenie małej ilości wpuszczanego gazu D_2 i granulek z zamrożonym paliwem deuterowym. W pracy [B2] zbadaliśmy oba przypadki dla scenariusza podstawowego. Pierwszy z nich charakteryzował się większą gęstością plazmy w SOL. W przypadku scenariusza z granulkami zaobserwowano nieznacznie wyższą temperaturę na płycie dywertora. Ze względu na zastosowaną konfigurację pola magnetycznego (ang. *corner configuration*), atomy wolframu wchodzące do plazmy dywertorowej stanowiły jedynie niewielki ułamek rozpylonych atomów ($< 10\%$) - ze względu na szybkie procesy ponownego osadzania (ang. *prompt re-deposition*). Ułamek rozpylonych atomów wolframu osadzany był bezpośrednio w niedostępnych obszarach, nie przyczyniając się tym samym do powstania strumienia wolframu. W obu wyładowaniach znaczna ilość niklu, a także niewielka ilość żelaza była uwalniana na skutek efektów oddziaływania pól RF i neutralów ze ścianą. Ekstrapolacja numeryczna wyników eksperymentalnych dla plazmy DT, przy zachowaniu niezmięnionej mocy wejściowej dodatkowego grzania $P_{\text{aux}} = 33$ MW, nie wykazała żadnej istotnej różnicy w odniesieniu do mocy docierającej do płyt dywertora w przypadku plazmy DT. Ekstrapolacja przy wyższych mocach $P_{\text{aux}} = 40$ MW i oryginalnym prądzie plazmy $I_p = 3$ MA wykazała zwiększenie mocy docierającej do płyty. Przy większym

prądzie plazmy $I_p = 4$ MA moc docierająca do plazmy pozostaje taka sama, chociaż temperatura płyty dywertora uległa nieznacznemu obniżeniu. Okazało się, że moc docierająca do płyty w obu przypadkach była zbyt duża, aby można ją było utrzymać przez około 5 s bez żadnej kontroli z użyciem domieszkowania zewnętrznego. W rzeczywistości w obu scenariuszach stosunkowo niewielki wzrost mocy promieniowania nie jest wystarczający, aby zrekompensować wzrost mocy wejściowej. Kontrola mocy docierającej do płyt dywertora może być bardziej krytyczna dla wyładowań, w których będą wstrzykiwane granulki z zamrożonym paliwem ze względu na zmniejszone promieniowanie w SOL.

4.3.3 Wnioski

Uzyskane wyniki mają fundamentalne znaczenie dla badań nad kontrolowaną syntezą termojądrową. Wykonane przeze mnie prace w dużym stopniu koncentrowały się na osiągnięciu celów pośrednich określonych w planie działania Unii Europejskiej na rzecz rozwoju termojądrowej konwersji energii.

Moja praca skupiała się na następujących działaniach:

- Kontrola zanieczyszczeń plazmy centralnej pochodzących z wolframowych komponentów ściany reaktora.
- Opracowanie scenariuszy operacyjnych dla przyszłych urządzeń termojądrowych pod kątem zwiększenia ich wydajności. Wykazanie dopuszczalnej koncentracji wolframu w przewidywanych reżimach reaktorów.
- Opracowanie scenariuszy grzania ICRH dla ITER-a i dla plazmy DT w układzie JET.
- Opanowanie procesu akumulacji zanieczyszczeń poprzez zastosowanie grzania ICRH.
- Minimalizacja sputteringu ciężkich zanieczyszczeń i lokalnych obciążeń cieplnych poprzez optymalizację parametrów plazmy brzegowej.
- Redukcja efektu RF-*sheath* poprzez modyfikację parametrów anten grzania ICRH.
- Opracowanie techniki iniekcji gazu w celu zmaksymalizowania mocy grzania ICRH dostarczanej do układu w reżimie H i redukcji zanieczyszczeń.
- Określenie roli niestabilności brzegowych ELM i niestabilności magnetohydrodynamicznych na zachowanie zanieczyszczeń.
- Określenie wpływu zewnętrznego domieszkowania plazmy na zachowanie wolframu.
- Ocena wpływu zewnętrznego domieszkowania na redukcję mocy docierającej do płyt dywertora.

Celem powyższych działań jest wytworzenie dodatniego bilansu energetycznego ($Q > 10$) omawianej reakcji a w ujęciu globalnym zapewnienie przyszłym pokoleniom bezpiecznego procesu uzyskiwania energii z niewyczerpalnych w istocie źródeł. Przeprowadzane przeze mnie badania i ich wyniki stanowią ważny wkład w rozumienie fizyki plazmy. Efekty mojej pracy wykorzystywane są przez międzynarodowe zespoły badawcze do modelowania wielu rozwiązań technicznych i optymalizacji procesów fizycznych w zakresie fuzji z magnetycznym utrzymywaniem plazmy (MCF-*Magnetic Confinement Fusion*).

5 OPIS INNYCH OSIĄGNIĘĆ NAUKOWYCH

Po rozpoczęciu w 2005 r. pracy w Instytucie Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy w Oddziale Fizyki Plazmy Wytwarzanej Laserem uczestniczyłam w badaniach dotyczących implantacji jonów generowanych laserem [B58], [B59] realizowanych w ramach europejskiego projektu SEMINANO. Celem prowadzonych badań było opracowanie i optymalizacja metody domieszkowania materiałów półprzewodnikowych. Celem formowania nanokryształów germanowych w wyniku implantacji w warstwie SiO_2 nałożonej na podłoże krzemowe jonów germanu generowanych laserem [B69], [B63], [B62], [B60], [C57], [C58]. Takie materiały z nanokryształami znajdują zastosowanie w budowie nowoczesnych podzespołów elektronicznych. Istotnym wyzwaniem tej metody było uzyskanie wysokoenergetycznych jonów za pomocą impulsów laserowych [B64]. Ponadto uczestniczyłam w badaniach szybkich, wysoko zjonizowanych jonów produkowanych w wyniku oddziaływania wiązki laserowej z materiałem tarczy o wysokiej liczbie atomowej Z . Badania te prowadzono z wykorzystaniem układów laserowych w IFPiLM [C48], [C63] w Ośrodku Badawczym PALS w Pradze Czeskiej [B54], [B55] oraz w laboratorium Istituto Nazionale di Fisica Nucleare di Laboratori Nazionale del Sud (INFN-LNS) w Katanii na Sycylii [B60], [C61]. Układy te różniły się parametrami wiązki laserowej, takimi jak długość fali, energia i czas trwania impulsu, moc lasera, repetycja i geometria ogniskowania. Dzięki temu wytwarzane były różne strumienie jonów, od wysoko energetycznych jonów generowanych na układzie laserowym PALS (Prague Asterix Laser System) oraz jonów niskoenergetycznych generowanych z dużą repetycją w IFPiLM i INFN-LNS. Przeprowadzone badania przyczyniły się do wzbogacenia wiedzy na temat procesów generacji jonów w wyniku oddziaływania wiązki laserowej z tarczą. W zależności od parametrów promieniowania laserowego i parametrów naświetlanej tarczy (materiał, kąt ustawienia) występują różne procesy generacji plazmy oraz przyspieszania jonów. Przy dużych natężeniach wiązki laserowej materiał tarczy jest szybko jonizowany i

generowana jest wysokotemperaturowa plazma, która ekspanduje adiabatycznie głównie w kierunku prostopadłym do tarczy, niezależnie od kąta padania wiązki laserowej. Parametry wiązki laserowej oraz parametry tarczy określają własności jonów, takie jak energia jonów, gęstość prądu jonowego, krotność jonizacji, rozkład kątowy i energetyczny. Strumienie jonów generowanych w wyniku oddziaływania wiązki lasera z tarczą badałam za pomocą dwóch diagnostyk jonowych. Kolektory jonów służyły do pomiaru średniej energii oraz rozkładu kąтового ekspandujących jonów, a elektrostatyczny analizator energii jonów wykorzystany był do pomiaru rozkładu energetycznego i krotności jonizacji. Obie diagnostyki bazowały na metodzie pomiaru czasu przelotu jonu od tarczy do detektora. W zależności od materiału tarczy i parametrów impulsu laserowego możliwa była generacja jonów o krotnościach jonizacji większych niż +50 i energiach od setek eV do dziesiątków MeV. Przy zastosowaniu impulsów laserowych o gęstościach mocy ponad 10^{18} W/cm² generowane były jony lekkich pierwiastków o energiach rzędu setek MeV. Przy małych gęstościach mocy rzędu 10^{10} W/cm² średnie energie kinetyczne ciężkich jonów osiągały wartość rzędu keV. Badania wykazały także, że dzięki zastosowaniu zewnętrznych pól elektrycznych jony mogą być ogniskowane i przyspieszane do energii wystarczających do zastosowania technologicznego. Zastosowanie pola elektrycznego do formowania wiązki pozwala na kontrolę strumienia jonów oraz na usunięcie z wiązki jonów o nieodpowiedniej energii i ładunku oraz jonów zanieczyszczeń. Zaimplantowane próbki poddawane były następnie badaniom materiałowym. Wykazały one koncentrację zaimplantowanych jonów wyższą od $\sim 10^{16}$ /cm². Głębokość implantacji wyniosła kilkaset nm.

Równolegle brałam udział w badaniach, których celem było opracowanie metody usuwania warstw osadzonych na wewnętrznych elementach układu termojądrowego (tokamaka). Warstwy te zwane kodepozytem, zawierają cząsteczki zanieczyszczeń plazmowych i cząstki paliwa (deuter i tryt). Ze względów eksploatacyjnych, jak i względów bezpieczeństwa warstwy te będą musiały być usuwane z elementów wewnętrznych w komorach reaktorów nowej generacji np. w tokamaku ITER. Jedną z metod umożliwiających takie usuwanie jest zastosowanie impulsów laserowych o odpowiedniej energii i gęstości mocy, dostosowanych do składu chemicznego i grubości usuwanej warstwy. Badania opisane artykułach [B67], [B65] przedstawiają pierwotną koncepcję usuwania warstw kodepozytu za pomocą nanosekundowych impulsów laserów Nd:YAG. Artykuł [B67] dotyczy samego procesu usuwania i jego monitorowania za pomocą jonowej diagnostyki korpuskularnej. Na podstawie badań stwierdzono, że metoda jest skuteczna w usuwaniu kodepozytu, jednak proces jest stosunkowo powolny, a diagnostyka jonowa jest odpowiednia raczej w warunkach laboratoryjnych, a nie we wnętrzu reaktora. Jako alternatywną technikę diagnostyczną

zapropowaliśmy spektroskopię optyczną, a jej przydatność została weryfikowana eksperymentalnie w artykule [B65]. Artykuł [B65] przedstawia oszacowanie parametrów plazmy (temperatury i gęstości elektronowej) na podstawie wyników spektroskopii optycznej. Co więcej, daje on wyraźny i ilościowy dowód na zmniejszenie widmowego składnika odpowiadającego paliwu (tj. deuterowi) w zarejestrowanych widmach w trakcie działania kolejnych impulsów laserowych. Wynik ten zachęcił do dalszych badań w IPPLM i innych laboratoriach z użyciem spektroskopii materiału z zastosowaniem wzbudzenia laserem (metoda LIBS – *Laser-Induced Breakdown Spectroscopy*) do analizy elementów ściany wewnętrznej tokamaka. Podsumowanie i uszczegółowienie wyżej wymienionych badań można znaleźć w [C62] i [C49], natomiast ich bezpośrednie rozwinięcie znaleźć można w [B6] i [B68], które dotyczą zastosowania LIBS dla charakteryzacji wolframu, jako podstawowego materiału dla dywertyora w układzie ITER. Eksperymenty przedstawione w tych pracach nie tylko wniosły nową wiedzę w zakresie oddziaływań lasera impulsowego dużej mocy z tarczami wolframowymi, lecz również były punktem wyjścia do badania zastosowania LIBS dla tzw. materiałów mieszanych, czyli zawierających pierwiastki adekwatne dla składu ściany przyszłych reaktorów fuzyjnych. Prace takie opisane zostały m. in. w [B40] oraz w przekrojowej pracy [B49]. Efektem prac było doskonalenie metody LIBS do zastosowań fuzyjnych, a w efekcie optymalizacja jej dwuimpulsowego wariantu (DP LIBS), który został opisany m. in. w [B25].

W ramach strategicznego projektu badawczego pt.: "Technologie wspomagające rozwój bezpiecznej energetyki jądrowej" NCBiR, w ramach zadania badawczego Nr 2 pt.: "Badania i rozwój technologii dla kontrolowanej fuzji termojądrowej", realizowałam badania dotyczące oddziaływania impulsowych strumieni plazmy z tarczami wykonanymi z W/CFC/SS (wolfram/kompozyt węglowy/ stal). Badania te były prowadzone pod kątem weryfikacji modeli numerycznych opisujących konwersję energii strumienia plazmy w energię promieniowania w plazmie uwalnianej z tarczy, depozycję tej energii na tarczy oraz spowodowaną tym zjawiskiem erozję materiału tarczy. Wyniki prac zostały opublikowane w [B37] i [B43].

Od 2006 roku w wyniku współpracy z ośrodkiem naukowym Culham Center for Fusion Energy (CCFE) w Wielkiej Brytanii, skoncentrowałam się na tematyce badań zanieczyszczeń w urządzeniach termojądrowych typu tokamak. Owocem tych prac jest opracowanie nowatorskiej i efektywnej metody analiz zanieczyszczeń o średnim Z w tokamaku JET [B50]. Metoda ta uwzględnia wpływ transportu cząstek oraz wpływ temperatury i gęstości elektronowej na wyznaczone parametry. Do opracowania metody wykorzystałam wyniki pomiarów spektroskopowych w zakresie VUV oraz wyniki symulacji numerycznych

wykonanych przeze mnie z użyciem kodu transportu zanieczyszczeń UTC-SANCO (*Universal Transport Code*). W analizach uwzględniłam intensywności linii widmowych jonów litopodobnych niklu, żelaza i miedzi dla wielu wyładowań w plazmie, charakteryzujących się różnymi profilami gęstości i temperatury plazmy. W symulacjach uwzględniłam szeroki zakres współczynników transportu dla dyfuzji - D i konwekcji - V , przy założeniu anomalnego charakteru transportu. Dla danej pary D i V symulowana intensywność linii widmowej była dopasowana do intensywności linii zmierzonej eksperymentalnie. Pozwoliło to na znalezienie liniowej zależności gęstość metalicznych zanieczyszczeń n_z , ich przyczynku do efektywnego ładunku plazmy - Δ_{Zeff} oraz do współczynnika rozrzedzenia plazmy - Δ_{nHDT} , od temperatury elektronowej. Nowo opracowana metoda została wykorzystana do badania zanieczyszczeń niklowych w tokamaku JET ze ścianą węglową. Najważniejsze wyniki zostały opublikowane w pracy [B44]. Problematyka ta weszła w zakres mojej pracy doktorskiej zatytułowanej „Badanie zanieczyszczeń plazmy termojądrowej w tokamaku JET z zastosowaniem nowej techniki spektroskopowej z zakresu VUV”. Obrona pracy doktorskiej odbyła się 17 kwietnia 2012 r. W dniu 12 czerwca 2012 r. Radą Naukową Narodowego Centrum Badań Jądrowych w Świerku podjęła uchwałę o nadaniu mi tytułu doktora nauk fizycznych. Po uzyskaniu stopnia doktora zintensyfikowałam swoją działalność naukową w tej dziedzinie. Zaowocowało to współpracą z innymi ośrodkami naukowymi w Europie. Dzięki temu mogłam prowadzić badania nad kontrolowaną syntezą termojądrową na tokamaku ASDEX-Upgrade w Niemczech i TCV w Szwajcarii.

Od 2008 roku byłam zaangażowana w prace związane z opracowaniem i budową diagnostyki PHA (*Pulse Height Analysis*) [B30], [C38], [C50] dla stelleratora Wendelstein 7-X (W7-X) działającego w miejscowości Greifswald w Niemczech. Projekt W7-X jest częścią programu fuzji jądrowej, który ma na celu badanie alternatywnej do tokamaka koncepcji magnetycznego utrzymania plazmy – koncepcji stellaratora. Projekt budowy diagnostyki realizowany był we współpracy z Max-Planck-Institute für Plasmaphysik (IPP) w Niemczech. We wstępnej fazie projektowania diagnostyki byłam zaangażowana w symulacje numeryczne przy użyciu kodu RayX [C37], [C38], [B29]. Intensywność i kształt widma rentgenowskiego były symulowane dla scenariuszy plazmy o różnych profilach temperatury i gęstości elektronowej oraz różnych poziomach mocy grzania ECRH. W symulacjach badałam wpływ geometrii układu diagnostycznego (rozmiar szczeliny, rozmiar detektora, położenie komponentów), czasu akwizycji, a także rodzaju i grubości filtrów. W symulacjach uwzględniane były procesy generowania promieniowania ciągłego, promieniowania rekombinacyjnego i liniowego. W wyniku symulacji uzyskaliśmy informacje na temat liczby

fotonów docierających do detektora oraz prądzie generowanym wewnątrz detektora. Symulacje okazały się istotne w procesie optymalizacji poszczególnych części diagnostyki. Po przeprowadzeniu testów laboratoryjnych [B30], diagnostyka PHA została zainstalowana na W7-X w drugiej połowie 2014 r. System pomiarowy PHA został włączony do grupy diagnostyk plazmy mierzących zanieczyszczenia plazmy centralnej [B34], [B28]. Stellarator W7-X rozpoczął działalność pod koniec 2015 roku. Pierwsza faza operacyjna (OP1.1) została przeprowadzona przy użyciu helu i wodoru, jako gazów roboczych. Wstępne eksperymenty poświęcone były uruchomieniu, testom i optymalizacji systemów diagnostycznych [B20], [B22]. Podczas pierwszej kampanii eksperymentalnej udało się zidentyfikować wiele linii spektralnych pochodzących od różnych zanieczyszczeń plazmy (S, Cl, Ar i Ne) [B6]. Pozwoliło to na badanie zachowania zanieczyszczeń podczas zmian konfiguracji pola magnetycznego [A4]. Diagnostyka PHA została wykorzystana także do wyznaczenia temperatury elektronowej plazmy [B10] oraz estymacji efektywnego ładunku Z_{eff} z porównania widma eksperymentalnego z teoretycznym. W drugiej fazie pracy na układzie W7-X (OP1.2a) z węglowym dywertorem w wyniku dalszej optymalizacji diagnostyki zarejestrowano i zidentyfikowano linie lekkich pierwiastków (C i O), a także linie pochodzące od pierwiastków o średnim Z (Cr, Fe, Ni i Cu). Podczas eksperymentu z LBO (*laser blow off*) i TESPEL (*Tracer Encapsulated Solid Pellet*) zidentyfikowano dodatkowo linie Si, Ti, V, Mn, Mo i W.

W Japonii, w ramach międzynarodowego zadania EUROfusion „WP18.S1.A1.T4 (Qualifications of TESPEL for W7-X OP1.2b: experiments and analysis on TJ-II and LHD and preparation for W7-X”, uczestniczyłam w eksperymentach na dużym urządzeniu termojądrowym (układ heliakalny) LHD (*Large Helical Device*). Głównym celem tych eksperymentów była kwalifikacja systemu TESPEL do badania transportu zanieczyszczeń w W7-X, a także badanie zanieczyszczeń podczas pierwszej kampanii eksperymentalnej z plazmą deuterową w LHD. Charakterystykę transportu zanieczyszczeń dokonywałam dla różnych scenariuszy grzania (z NBI, z ECRH i NBI+ECRH) i gęstości plazmy. Badania wykazały, że czas zaniku ciężkich jonów (V, Mn i Fe) jest skorelowany z gęstością elektronową i rodzajem plazmy (wodór i deuter) [C3].

Jestem współautorką 85 publikacji naukowych w międzynarodowych czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports (JRC), z czego 63 ukazało się po uzyskaniu tytułu doktora. Ponadto 66 publikacji z moim udziałem ukazało się w międzynarodowych czasopismach innych niż w wyżej wymienionej bazie. Z czego 40 ukazało się po uzyskaniu tytułu doktora. Brałam aktywny udział w międzynarodowych konferencjach naukowych i szkołach fizyki plazmy, na których łącznie wygłosiłam 9 referatów i zaprezentowałam 13

plakatów naukowych. Oprócz tego, jestem współautorką ok. 60 doniesień konferencyjnych (posterów i wystąpień ustnych) prezentowanych przez moich współpracowników. Wygłosiłam też 38 referatów na seminariach i spotkaniach organizowanych w kraju i za granicą.

W latach 2012-2013 w IFPiLM byłam kierownikiem projektu EFDA „High Power ICRH operation with metallic plasma facing components”, realizowanego w ramach współpracy międzynarodowej na tokamaku ASDEX-Upgrade. Od 2013 r. jestem krajowym koordynatorem naukowym projektu badawczego EUROfusion WPJET1: JET Experimental Campaigns. Jestem odpowiedzialna za organizowanie działań wykonywanych przez naukowców z ośrodków w całej Polsce na rzecz badań prowadzonych na tokamaku JET. W 2014 r. powierzono mi także funkcję krajowego koordynatora naukowego projektu badawczego EUROfusion WPMST1: Medium-Size Tokamak Campaigns, w ramach, którego polscy uczeni uczestniczą w kampaniach eksperymentalnych na tokamaku ASDEX-Upgrade, TCV i MAST-U. W 2017 r. dzięki mojemu zaangażowaniu w badania zanieczyszczeń plazmy konsorcjum EUROfusion powołało mnie na międzynarodowego koordynatora naukowego zadania badawczego w JET „T17-06: Impact of ICRH on impurities for optimisation of scenarios”. Projekt ten będzie realizowany do 2020 r. W pracach nad nim uczestniczy międzynarodowy zespół fizyków z Belgii, Francji, Niemiec, Polski, Wielkiej Brytanii, Włoch i USA. Celem tego zadania przegląd empirycznych metod optymalizacji ICRH. Opracowanie i walidacja modeli teoretycznych, pola elektrycznego wytwarzanego wokół anten ICRH, efektu RF-*sheath* i erozji ścian. Ma to na celu zarekomendowanie optymalizacji, które jeszcze nie były stosowane w JET.

Prace dotyczące badania zanieczyszczeń w układach typu tokamaka były podstawą do przyznania mi w 2018 roku Nagrody Dyrektora IFPiLM za koordynację zadania „Impact of ICRH on impurities for optimisation of scenarios” i badania w tym obszarze, oraz w roku 2012 Nagrody Dyrektora IFPiLM za osiągnięcia naukowo-badawcze w dziedzinie badań zanieczyszczeń plazmy termojądrowej w tokamaku JET z zastosowaniem nowej metody spektroskopowej w zakresie VUV, służącej do wyznaczania gęstości zanieczyszczeń metalicznych (Ni, Fe, Cu, Cr), ich wkładu do efektywnego ładunku plazmy (ΔZ_{eff}) oraz współczynnika rozrzedzenia plazmy. W 2015 r. otrzymałam Nagrodę Dyrektora IFPiLM za wyróżniające się osiągnięcia naukowe i za współudział w zainstalowaniu oraz uruchomienie diagnostyki PHA na stellaratorze W7-X. W 2013 r. otrzymałam także nagrodę z dotacji statutowej za działalność związaną z prowadzeniem badań naukowych lub prac rozwojowych oraz zadań z nimi związanych, służących rozwojowi młodych naukowców.

Byłam przewodniczącą komitetu organizacyjnego 14th Coordinated Heliotron Working Group Meeting (CWGM) w 2015 r. Byłam także współorganizatorem międzynarodowych

konferencji naukowych takich jak: 34th EPS Conference on Plasma Physics, International Conference on Research and Applications of Plasmas PLASMA-2011, International Conference on Research and Applications of Plasmas PLASMA-2015 oraz 9 i 11 edycji szkoły fizyki plazmy Kudowa Summer School” Towards Fusion Energy. Reprezentowałam IFPiLM na Piknikach Naukowych Polskiego Radia i Centrum Nauki Kopernik oraz byłam koordynatorem spotkań w IFPiLM w ramach warszawskiego Festiwalu Nauki. Prowadziłam wykład pt. „Wstęp do fizyki plazmy i energetyki termojądrowej” na wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej. Przygotowałam także wykłady do przedmiotu „Thermonuclear synthesis”. Był to wykład dla nowych specjalności – studia 2-ego stopnia na Wydziale Mechaniki Elektrycznej i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej.

Szczegółowy wykaz wyżej wymienionych osiągnięć znajduje się w Załączniku 6_Wykaz opublikowanych prac naukowych oraz informacje o osiągnięciach dydaktycznych, współpracy naukowej i popularyzacji nauki.

6 Dane bibliometryczne: kwiecień 2019

Sumaryczny impact factor według listy Journal Citation Reports (JCR), zgodnie z rokiem opublikowania: 244,286

Liczba cytowań publikacji według bazy Web of Science (WoS): 1274, bez autocytowań 994 (Scopus 1415, bez autocytowań 1161)

Indeks Hirscha według bazy Web of Science (WoS): 19 (Scopus 21)

7 Wykaz innych (niewchodzących w skład osiągnięcia wymienionego w pkt 4.2) opublikowanych prac naukowych

7.1 Publikacje naukowe w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports (JRC)

[B1] L. Garzotti, C. Challis, R. Dumont, D. Frigione, J. Graves, E. Lerche, J. Mailloux, M. Mantsinen, F. Rimini, F. Casson, **A. Czarnecka**, J. Eriksson, R. Felton, L. Frassinetti, D. Gallart, J. Garcia, C. Giroud, E. Joffrin, H.-T.Kim, N. Krawczyk, M. Lennholm, P. Lomas, C. Lowry, L. Meneses, I. Nunes, M. Romanelli, S. Sharapov, S. Silburn, A. Sips, E. Stefániková, M. Tsalas, D. Valcarcel, M. Valovič and JET contributors, 2019, **Scenario development for DT operation at JET**, Nuclear Fusion, 59, 076037

[B2] G. Telesca, I. Ivanova-Stanik, R. Zagórski, S. Brezinsek, P. J. Carvalho, **A. Czarnecka**, C. Giroud, A. Huber, E. Lerche, S. Wiesen and JET contributors, 2019, **COREDIV numerical simulation of high neutron rate JET-ILW DD pulses in view of extension to JET-ILW DT experiments**, Nuclear Fusion 59, 056026

- [B3] V. Bobkov, D. Aguiam, R. Bilato, S. Brezinsek, L. Colas, **A. Czarnecka**, P. Dumortier, R. Dux, H. Faugel, H. Fünfgelder, Ph. Jacquet, A. Kallenbach, A. Krivska, C.C. Klepper, E. Lerche, Y. Lin, D. Milanesio, R. Maggiora, I. Monakhov, R. Neu, J.-M. Noterdaeme, R. Ochoukoa, Th. Pütterich, M. Reinke, W. Tierens, A. Tuccilo, O. Tudisco, D. Van Eester, J. Wright, S. Wukitch, W. Zhang, the ASDEX Upgrade Team, the Alcator C-Mod Team, the EUROfusion MST1 Team, JET contributors, 2019, **Impact of ICRF on the scrape-off layer and on plasma wall interactions: From present experiments to fusion reactor**, Nuclear Materials and Energy 18 (2019) 131–140
- [B4] R. Zagorski, **A. Czarnecka**, I. Ivanova-Stanik, C. Challis, 2018, Modelling of JET DT experiments in ILW configurations, Contributions to Plasma Physics 58, 739-745
- [B5] M. Kubkowska, **A. Czarnecka**, T. Fornal, M. Gruca, S. Jabłoński, N. Krawczyk, L. Ryc, R. Burhenn, B. Buttenschön, B. Geiger, O. Grulke, A. Langenberg, O. Marchuk, K. J. McCarthy, U. Neuner, D. Nicolai, N. Pablant, B. Schweer, H. Thomsen, Th. Wegner, P. Drews, K.-P. Hollfeld, C. Killer, Th. Krings, G. Offermanns, G. Satheeswaran, F. Kunkel, and W7-X team, 2018, **Plasma impurities observed by a pulse height analysis diagnostic during the divertor campaign of the Wendelstein 7-X stellarator**, Review of Scientific Instruments 89, 10F111
- [B6] M. Kubkowska, **A. Czarnecka**, T. Fornal, M. Gruca, N. Krawczyk, S. Jabłoński, L. Ryc, H. Thomsen, K. J. McCarthy, C. Biedermann, B. Buttenschön, A. Alonso, R. Burhenn, W7-X team, 2018, **First Results from the Soft X-ray Pulse Height Analysis System on Wendelstein 7-X Stellarator**, Fusion Engineering and Design 136, 58-62
- [B7] A. Dinklage, C. D. Beidler, P. Helander, G. Fuchert, H. Maaßberg, K. Rahbarnia, T. Sunn Pedersen, Y. Turkin, R. C. Wolf, A. Alonso, T. Andreeva, B. Blackwell, S. Bozhenkov, B. Buttenschön, **A. Czarnecka**, F. Effenberg, Y. Feng, J. Geiger, M. Hirsch, U. Höfel, M. Jakubowski, T. Klinger, J. Knauer, G. Kocsis, A. Krämer-Flecken, M. Kubkowska, A. Langenberg, H. P. Laqua, N. Marushchenko, A. Mollén, U. Neuner, H. Niemann, E. Pasch, N. Pablant, L. Rudischhauser, H. M. Smith, O. Schmitz, T. Stange, T. Szepesi, G. Weir, T. Windisch, G. A. Wurden, D. Zhang and the W7-X Team, 2018, **Magnetic configuration effects on the Wendelstein 7-X stellarator**, Nature Physics 14, 55–860
- [B8] D. Gallart, M. J. Mantsinen, C. Challis, D. Frigione, J. Graves, E. Belonohy, F. Casson, **A. Czarnecka**, J. Eriksson, J. Garcia, M. Goniche, C. Hellesen, J. Hobirk, P. Jaquet, E. Joffrin, N. Krawczyk, D. King, M. Lennholm, E. Lerche, E. Pawelec, X. Sáez, M. Sertoli, G. Sips, E. Solano, M. Tsalas, P. Vallejos, M. Valisa, and JET Contributors, 2018, **Modelling of JET hybrid plasmas with emphasis on performance of combined ICRF and NBI heating**, Nuclear Fusion 58, 106037
- [B9] R. J. Dumont, J. Mailloux, V. Aslanyan, M. Baruzzo, C.D. Challis, I. Coffey, **A. Czarnecka**, E. Delabie, J. Eriksson, J. Faustin, J. Ferreira, M. Fitzgerald, J. Garcia, L. Giacomelli, C. Giroud, N. Hawkes, Ph. Jacquet, E. Joffrin, T. Johnson, D. Keeling, D. King, V. Kiptily, B. Lomanowski, E. Lerche, M. Mantsinen, L. Meneses, S. Menmuir, K. Mc. Clements, S. Moradi, F. Nabais, M. Nocente, A. Patel, H. Patten, P. Puglia, R. Scannell, S. Sharapov, E. R. Solano, M. Tsalas, P. Vallejos, H. Weisen and JET contributors, 2018, **Scenario development for the observation of alpha-driven instabilities in JET DT plasmas**, Nucl. Fusion 58, 082005

- [B10] N. Krawczyk, M. Kubkowska, **A. Czarnecka**, S. Jablonski, M. Gruca, T. Fornal, L. Ryć, H. Thomsen, G. Fuchert, W7-X team, 2018, **Electron temperature estimation using the Pulse Height Analysis system at Wendelstein 7-X stellarator**, Fusion Engineering and Design 136, 1291-1294
- [B11] Ye. O. Kazakov, J. Ongena, J. C. Wright, S. J. Wukitch, E. Lerche, M. J. Mantsinen, D. Van Eester, T. Craciunescu, V. G. Kiptily, Y. Lin, M. Nocente, F. Nabais, M. F. F. Nave, Y. Baranov, J. Bielecki, R. Bilato, V. Bobkov, K. Crombé, **A. Czarnecka**, J. M. Faustin, R. Felton, M. Fitzgerald, D. Gallart, L. Giacomelli, T. Golfinopoulos, A. E. Hubbard, Ph. Jacquet, T. Johnson, M. Lennholm, T. Loarer, M. Porkolab, S. E. Sharapov, D. Valcarcel, M. Van Schoor, H. Weisen, The Alcator C-Mod Team & JET Contributors, 2017, **Efficient generation of energetic ions in multi-ion plasmas by radio-frequency heating**, Nature Physic 13, 973
- [B12] G. Telesca, I. Ivanova-Stanik, R. Zagórski, S. Brezinsek, **A. Czarnecka**, P. Drewelow, C. Giroud, A. Huber, S. Wiesen, M. Wischmeier, JET contributors, 2017, **High power neon seeded JET discharges: Experiments and simulations**, Nuclear Materials and Energy 12, 882-886
- [B13] R. C. Wolf, (**A. Czarnecka**), et al., 2017, **Major results from the first plasma campaign of the Wendelstein 7-X stellarator**, Nuclear Fusion 57, 102020
- [B14] A. Kallenbach, (**A. Czarnecka**), et al., 2017, **Overview of ASDEX Upgrade results**, Nuclear Fusion 57, 102015
- [B15] H. Mayer, (**A. Czarnecka**), et al., 2017, **Overview of progress in European medium sized tokamaks towards an integrated plasma-edge/wall solution**, Nuclear Fusion 57, 102014
- [B16] X. Litaudon, (**A. Czarnecka**), et al., 2017, **Overview of the JET results in support to ITER**, Nuclear Fusion 57, 102001
- [B17] M. Hirsch, A. Dinklage, A. Alonso, G. Fuchert, S. Bozhenkov, U. Höfel, T. Andreeva, J. Baldzuhn, M. Beurskens, H.-S. Bosch, C.D. Beidler, C. Biedermann, E. Blanco, R. Brakel, R. Burhenn, B. Buttenschön, A. Cappa, **A. Czarnecka**, M. Ender, T. Estrada, T. Fornal, J. Geiger, O. Grulke, J.H. Harris, D. Hartmann, M. Jakubowski, T. Klinger, J. Knauer, G. Kocsis, R. König, P. Kornejew, A. Krämer-Flecken, N. Krawczyk, M. Krychowiak, M. Kubkowska, I. Ksiazek, A. Langenberg, H.P. Laqua, S. Lazerson, H. Maaßberg, N. Marushchenko, S. Marsen, V. Moncada, D. Moseev, D. Naujoks, M. Otte, N. Pablant, E. Pasch, F. Pisano, K. Rahbarnia, T. Schröder, T. Stange, L. Stephey, T. Szepesi, T. Sunn Pedersen, H. Trimino Mora, H. Thomsen, H. Tsuchiya, Yu. Turkin, T. Wauters, G. Weir, U. Wenzel, A. Werner, R. Wolf, G.A. Wurden, D. Zhang and the W7-X Team, 2017, **Confinement in Wendelstein 7-X limiter plasmas**, Nucl. Fusion 57, 086010
- [B18] S. Coda, (**A. Czarnecka**), et al., 2017, **Overview of the TCV Tokamak Program: Scientific Progress and Facility Upgrades**, Nuclear Fusion 57, 102011
- [B19] T. Sunn Pedersen, (**A. Czarnecka**), et al., 2016, **Confirmation of the topology of the Wendelstein7-X magnetic field to better than 1:100,000**, NATURE COMMUNICATIONS 7, 13493
- [B20] M. Krychowiak, A. Adnan, A. Alonso, T. Andreeva, J. Baldzuhn, T. Barbui, M. Beurskens, W. Biel, C. Biedermann, B. D. Blackwell, H. S. Bosch, S. Bozhenkov, R. Brakel, T. Bräuer, B. Brotas de Carvalho, R. Burhenn, B. Buttenschön, A. Cappa, G. Cseh, **A. Czarnecka**, A.

- Dinklage, P. Drews, A. Dzikowicka, F. Effenberg, M. Endler, V. Erckmann, T. Estrada, O. Ford, T. Fornal, H. Frerichs, G. Fuchert, J. Geiger, O. Grulke, J. H. Harris, H. J. Hartfuß, D. Hartmann, D. Hathiramani, M. Hirsch, U. Höfel, S. Jabłoński, M. W. Jakubowski, J. Kaczmarczyk, T. Klinger, S. Klose, J. Knauer, G. Kocsis, R. König, P. Kornejew, A. Krämer-Flecken, N. Krawczyk, T. Kremeyer, I. Książek, M. Kubkowska, A. Langenberg, H. P. Laqua, M. Laux, S. Lazerson, Y. Liang, S. C. Liu, A. Lorenz, A. O. Marchuk, S. Marsen, V. Moncada, D. Naujoks, H. Neilson, O. Neubauer, U. Neuner, H. Niemann, J. W. Oosterbeek, M. Otte, N. Pablant, E. Pasch, T. Sunn Pedersen, F. Pisano, K. Rahbarnia, L. Ryć, O. Schmitz, S. Schmuck, W. Schneider, T. Schröder, H. Schuhmacher, B. Schweer, B. Standley, T. Stange, L. Stephey, J. Svensson, T. Szabolics, T. Szepesi, H. Thomsen, J.-M. Travere, H. Trimino Mora, H. Tsuchiya, G. M. Weir, U. Wenzel, A. Werner, B. Wiegel, T. Windisch, R. Wolf, G. A. Wurden, D. Zhang, A. Zimbal, S. Zoletnik, and W7-X Team, 2016, **Overview of diagnostic performance and results for the first operation phase in Wendelstein 7-X**, Review of Scientific Instruments 87, 11D304
- [B21] N. B. Marushchenko, A. Dinklage, A. Alonso, J. Baldzuhn, C. D. Beidler, C. Biedermann, B. Blackwell, S. Bozhenkov, R. Brakel, B. Buttenschön, Y. Feng, G. Fuchert, J. Geiger, M. Hirsch, U. Hoefel, J. Knauer, A. Krämer-Flecken, A. Langenberg, H. P. Laqua, M. Landreman, H. Maassberg, N.A. Pablant, E. Pasch, K. Rahbarnia, L. Rudischhauser, T. Stange, L. Stephey, H. Trimino-Mora, Yu. Turkin, J.-L. Velasco, G. Wurden, D. Zhang, T. Andreeva, M. Beurskens, E. Blanco, H.-S. Bosch, R. Burhenn, A. Cappa, **A. Czarnecka**, M. Dostal, P. Drews, M. Endler, T. Estrada, T. Fornal, O. Grulke, D. Hartmann, J.H. Harris, P. Helander, M. Jakubowski, T. Klinger, S. Klose, G. Kocsis, R. König, P. Kornejew, N. Krawczyk, M. Krychowiak, M. Kubkowska, I. Kiazek, S. Lazerson, Y. Liang, S. Liu, O. Marchuk, S. Marsen, V. Moncada, D. Moseev, D. Naujoks, H. Niemann, M. Otte, T.S. Pedersen, F. Pisano, K. Riße, T. Rummel, O. Schmitz, S. Satake, H. Smith, T. Schröder, T. Szepesi, H. Thomsen, P. Traverso, M. Tsuchiya, N. Wang, T. Wauters, G. Weir, R. Wolf, M. Yokoyama and the W7-X Team, 2016, **Main results of the first experimental campaign in the stellarator W7-X**, Problems of Atomic Science and Technology, 106 (6), 3-8
- [B22] N. Krawczyk, C. Biedermann, **A. Czarnecka**, T. Fornal, S. Jablonski, J. Kaczmarczyk, M. Kubkowska, F. Kunkel, K. J. McCarthy, L. Ryć, H. Thomsen, A. Weller, W7-X team, 2017, **Commissioning and first operation of the pulse-height analysis diagnostic on Wendelstein 7-X stellarator**, Fusion Engineering and Design 123, 1006-1010
- [B23] K. Gałazka, I. Ivanova-Stanik, M. Bernert, **A. Czarnecka**, A. Kallenbach, R. Zagórski, and the ASDEX Upgrade Team, 2016, **Impurity seeding in ASDEX Upgrade tokamak modeled by COREDIV code**, Contributions to Plasma Physics 56, 772
- [B24] G. Telesca, I. Ivanova-Stanik, R. Zagórski, S. Brezinsek, **A. Czarnecka**, P. Drewelow, C. Giroud, A. Huber, S. Wiesen, and JET EFDA contributors, 2016, **Core-SOL Modelling of Neon Seeded JET Discharges with the ITER-like Wall**, Contributions to Plasma Physics 56, 748
- [B25] S. Almaviva, L. Caneve, F. Colao, G. Maddaluno, N. Krawczyk, **A. Czarnecka**, P. Gasior, M. Kubkowska and M. Lepek, 2016, **Measurements of deuterium retention and surface elemental composition with double pulse laser induced breakdown spectroscopy**, Phys. Scr. T167, 014043
- [B26] R. Zagórski, I. Ivanova-Stanik, **A. Czarnecka**, G. Telesca, S. Brezinsek, 2015, **Influence of Seeding and SOL Transport on Plasma Parameters in JET ITER-Like Wall H-Mode Discharges**, Journal of Nuclear Materials Volume 463, Pages 649-653 (2015)

- [B27] H. Zohm, (A. Czarnecka), et. al., 2015, **Recent ASDEX Upgrade research in support of ITER and DEMO**, Nuclear Fusion 55, 104010
- [B28] R. Köning, W. Biel, C. Biedermann, R. Burhenn, G. Cseh, A. Czarnecka, M. Endler, T. Estrada, O. Grulke, D. Hathiramani, M. Hirsch, S. Jabłonski, M. Jakubowski, J. Kaczmarczyk, G. Kocsis, P. Kornejew, M. Krychowiak, M. Kubkowska, A. Langenberg, M. Laux, Y. Liang, A. Lorenz, O. Neubauer, M. Otte, N. Pablant, E. Pasch, T. S. Pedersen, O. Schmitz, W. Schneider, H. Schuhmacher, B. Schweer, H. Thomsen, T. Szepesi, B. Wiege, T. Windisch, S. Wolf, G. Wurden, D. Zhang, S. Zoletnik, 2015, **The Set of Diagnostics for the First Operation Campaign of the Wendelstein 7-X Stellarator**, JINST 10, P10002
- [B29] S. Jabłonski, A. Czarnecka, J. Kaczmarczyk, M. Kubkowska, L. Ryć, A. Weller, C. Biedermann, R. König, 2015, **Simulation of PHA soft x-ray spectra expected from W7-X S**, JINST 10, P10021
- [B30] M. Kubkowska, A. Czarnecka, W. Figacz, S. Jabłonski, J. Kaczmarczyk, N. Krawczyk, L. Ryć, C. Biedermann, R. Koenig, H. Thomsen, A. Weller and W7-X team, 2015, **Laboratory tests of the Pulse Height Analysis System for Wendelstein 7-X**, JINST 10, P10016
- [B31] F. Romanelli, (A. Czarnecka), et. al., 2015, **Overview of the JET results** Nucl. Fusion 55, 104001
- [B32] K. D. Lawson, M. Groth, P. Belo, S. Brezinsek, A. Czarnecka, P. Drewelow, D. Harting, I. Książek, C. F. Maggi, A. G. Meigs, S. Menmuir, M. F. Stamp & JET-EFDA, 2015, **Improved EDGE2D/EIRENE simulations of JET ITER-like wall L-mode discharges utilizing poloidal VUV/visible spectral emission profiles**, Journal of Nuclear Materials 463, 582-58
- [B33] E. Lerche M. Goniche, D. Van Eester, P. Jacquet, V. Bobkov, L. Colas, S. Brezinsek, A. Czarnecka, M. Graham, M. Groth, I. Monakhov, C. Noble, F. Rimini A. Shaw, JET-EFDA Contributors, 2015, **Impact of gas injection on ICRF coupling and SOL parameters in JET-ILW H-mode plasmas**, Journal of Nuclear Materials 463, 634-639
- [B34] R. König, W. Biel, C. Biedermann, R. Burhenn, G. Cseh, A. Czarnecka, M. Endler, T. Estrada, O. Grulke, D. Hathiramani, M. Hirsch, S. Jabłonski, M. Jakubowski, J. Kaczmarczyk, W. Kasperek, G. Kocsis, P. Kornejew, A. Kramer-Flecken, M. Krychowiak, M. Kubkowska, A. Langenberg, M. Laux, Y. Liang, A. Lorenz, O. Neubauer, M. Otte, N. Pablant, E. Pasch, T. Pedersen, O. Schmitz, W. Schneider, H. Schuhmacher, B. Schweer, h. Thomsen, T. Szepesi, B. Wiegel, T. Windisch, S. Wolf, D. Zhang, S. Zoletnik, 2014, **Status of the diagnostics development for the first operation phase of the stellarator Wendelstein 7-X**, Review of Scientific Instruments 85, 11D818
- [B35] I. Ivanova-Stanik, R. Zagorski, G. Telesca, A. Czarnecka, C. Challis, J. Horbrik, 2014, **Integrated modeling of Nitrogen seeded JET ILW discharges for H-mode and hybrid scenarios**, Contributions to Plasma Physics 54, 442-447
- [B36] P. Jacquet, V. Bobkov, S. Brezinsek, M. Brix, A.-L. Campergue, L. Colas, A. Czarnecka, P. Drewelow, M. Graham, C. C. Klepper, E. Lerche, M.-L. Mayoral, A. Meigs, D. Milanesio, I. Monakhov, J. Mlynar, T. Pütterich, A. Sirinelli, D. Van-Eester, and JET-EFDA contributors, 2014, **Ion cyclotron resonance frequency heating in JET during initial operations with the ITER-like wall**, Physics of Plasmas 21, 061510-11

- [B37] E. Kowalska-Strzęciwilk, W. Skrzeczanowski, **A. Czarnecka**, M. Kubkowska, M. Paduch and E. Zielińska, 2014, **Analysis of soft X-ray signals generated by the PF 1000 facility in experiments with solid targets**, Physica Scripta T161, 014048
- [B38] K. Slabkowska, E. Szymanska, J. Starosta, M. Polasik, N. R Pereira, J. Rzakiewicz, M. Kubkowska and **A. Czarnecka**, 2014, **Diagnostics of plasma based on K, L and M x-ray line positions**, Physica Scripta T161, 014033
- [B39] C. Klepper, P. Jacquet, V. Bobkov, L. Colas, T. M. Biewer, D. Borodin, **A. Czarnecka**, C. Giroud, E. Lerche, V. Martin, M.-L. Mayoral, F. Rimini, G. Sergienko, D. VanEester, 2013, **RF sheath-enhanced beryllium sources at JET's ICRH antennas**, Journal of Nuclear Materials 438, S594–S598
- [B40] V. Philipps, A. Malaquias, A. Hakola, J. Karhunen, G. Maddaluno, S. Almaviva, L.Caneve, Colao, E.Fortuna, P. Gasior, M. Kubkowska, **A. Czarnecka**, M. Laan, A. Lissovski, P. Paris , H.J. van der Meiden, P. Petersson , M. Rubel, A. Huber, M. Zlobinski, B. Schweer, N.Gierse, Q. Xiao, G. Sergienko, 2013, **Development of Laser Based Techniques for In Situ Characterization of the First Wall in ITER and Future Fusion Devices**, Nuclear Fusion 53, 093002
- [B41] H.-S. Bosch, (**A. Czarnecka**), et al., 2013, **Technical challenges in the construction of the steady-state stellarator Wendelstein 7-X**, Nuclear Fusion 53, 126001
- [B42] F. Romanelli, (**A. Czarnecka**), et al., 2013, **Overview of the JET results with the ITER-like wall**, Nuclear Fusion 53, 104002
- [B43] **A. Czarnecka**, M. Kubkowska, E. Składnik-Sadowska, E. Kowalska-Strzęciwilk, P. Parys, M. J. Sadowski, K. Malinowski, R. Kwiatkowski, and M. Ladygina, 2013, **Spectroscopic and corpuscular analysis of laser-produced carbon plasma**, Problems of atomic science and technology 83, 258-260
- [B44] **A. Czarnecka**, V. Bobkov, I. H. Coffey, L. Colas, F. Durodié, A. C. A. Figueiredo, P. Jacquet, K. D. Lawson, E. Lerche, M.-L. Mayoral, I. Monakhov, J. Ongena, D. Van Eester, K.-D. Zastrow and JET-EFDA contributors, 2012, **Impurity production by the ICRF antennas in JET**, Plasma Physics Controlled Fusion 54, 074013
- [B45] F. Durodié, M. P. S. Nightingale, M.-L. Mayoral, J. Ongena, A. Argouarch, G. Berger-By, T. Blackman, V. Cocilovo, **A. Czarnecka**, S. Dowson, D. Frigione, R. Goulding, M. Graham, J. Hobirk, S. Huygen, S. Jachmich, P. Jacquet, E. Lerche, P. U. Lamalle, T. Loarer, R. Maggiora, A. Messiaen, D. Milanese, I. Monakhov, M. F. F. Nave, F. Rimini, H. Sheikh, C. Sozzi, M. Tsalias, D. Van Eester, M. Vrancken, A. Whitehurst, E. Wooldridge, K.-D. Zastrow and JET-EFDA contributors, 2012, **Physics and engineering results obtained with the ion cyclotron range of frequencies ITER-like antenna on JET**, Plasma Physics Controlled Fusion 54, 074012
- [B46] M. Graham, M.-L. Mayoral, I. Monakhov, J. Ongena, T. Blackman, M. P. S. Nightingale, E. Wooldridge, F. Durodie, A. Argouarch, G. Berger-By, **A Czarnecka**, S. Dowson, R. Goulding, S. Huygen, P. Jacquet, T. J. Wade, E. Lerche, P. U. Lamalle, H. Sheikh, .D Van Eester, M. Vrancken, A. Walden, A. Whitehurst and JET-EFDA contributors, 2012, **Implementation of load resilient ion cyclotron resonant frequency (ICRF) systems to**

couple high levels of ICRF power to ELMy H-mode plasmas in JET, Plasma Physics Controlled Fusion 54 (2012) 074011

[B47] D. Van Eester, E. Lerche, T. Johnson, T. Hellsten, J. Ongena, M.-L. Mayoral, D. Frigione, C. Sozzi, G. Calabro, M. Lennholm, P. Beaumont, T. Blackman, D. Brennan, A. Brett, M. Cecconello, I. Coffey, A. Coyne, K. Crombe, **A. Czarnecka**, R. Felton, M. Gatu Johnson, C. Giroud, G. Gorini, C. Hellesen, P. Jacquet, Y. Kazakov, V. Kiptily, S. Knipe, A. Krasilnikov, Y. Lin, M. Maslov, I. Monakhov, C. Noble, M. Nocente, L. Pangioni, I. Proverbio, M. Stamp, W. Studholme, M. Tardocchi, T. W. Versloot, V. Vdovin, A. Whitehurst, E. Wooldridge, V. Zoita and JET EFDA Contributors, 2012, **Minority and mode conversion heating in (³He)-H JET plasmas**, Plasma Physics Controlled Fusion 54 (2012) 074009

PUBLIKACJE, KTÓRE UKAZAŁY SIĘ PRZED UZYSKANIEM TUTUŁU DOKTORA

[B48] **A. Czarnecka**, E. Lerche, J. Ongena, D. Van Eester, A. C. A. Figueiredo, I. H. Coffey, K.-D. Zastrow and JET-EFDA contributors, 2012, **Impurity studies in ITER half-field ICRF heating scenarios in Hydrogen plasmas on JET**, Nukleonika 57, 25–30

[B49] M. Kubkowska, P. Gąsior, **A. Czarnecka**, M. Rosiński, J. Wołowski, 2012, **Overview of the application of laser-based techniques in plasma-wall interaction research program at IFPiLM**, Nukleonika 57, 163–166

[B50] **A. Czarnecka**, J. Rządkiwicz, K.-D. Zastrow, K. D. Lawson, I. H. Coffey, M. G. O'Mullane and JET-EFDA contributors, 2011, **Determination of metal impurity density, ΔZ_{eff} and dilution on JET by VUV emission spectroscopy**, Plasma Physics and Control. Fusion 53, 035009

[B51] P. Jacquet, L. Colas, M.-L. Mayoral, G. Arnoux, V. Bobkov, M. Brix, **A. Czarnecka**, D. Dodt, F. Durodie, A. Ekedahl, M. Fursdon, E. Gauthier, M. Goniche, M. Graham, E. Jofrin, E. Lerche, J. Mailloux, I. Monakhov, J. Ongena, V. Petrzilka, A. Korotkov, F. Rimini, A. Sirinelli, D. Frigione, C. Portafaix, V. Riccardo, Z. Vizvary, K.-D. Zastrow, and JET EFDA Contributors, 2011, **Heat-Loads on JET Plasma Facing Components from ICRF and LH Wave Absorption in the SOL**, Nuclear Fusion 51, 103018

[B52] E. Lerche, D. Van Eester, J. Ongena, M.-L. Mayoral, M. Laxaback, F. Rimini, A. Argouarch, P. Beaumont, T. Blackman, V. Bobkov, D. Brennan, A. Brett, G. Calabro, M. Cecconello, I. Coffey, L. Colas, A. Coyne, K. Crombe, **A. Czarnecka**, R. Dumont, F. Durodie, R. Felton, D. Frigione, M. Gatu Johnson, C. Giroud, G. Gorini, M. Graham, C. Hellesen, T. Hellsten, S. Huygen, P. Jacquet, T. Johnson, V. Kiptily, S. Knipe, A. Krasilnikov, P. Lamalle, M. Lennholm, A. Loarte, R. Maggiora, M. Maslov, A. Messiaen, D. Milanesio, I. Monakhov, M. Nightingale, C. Noble, M. Nocente, L. Pangioni, I. Proverbio, C. Sozzi, M. Stamp, W. Studholme, M. Tardocchi, T. W. Versloot, V. Vdovin, M. Vrancken, A. Whitehurst, E. Wooldridge, V. Zoita and JET EFDA Contributors, 2011, **Optimizing ion-cyclotron resonance frequency heating for ITER: dedicated JET experiments**, Plasma Physics and Controlled Fusion 53, 124019

[B53] F. Romanelli, (**A. Czarnecka**), et al., 2011 **Overview of the JET results**, Nuclear Fusion 51, 094008

[B54] J. Krása, A. Velyhan, E. Krouský, L. Láská, K. Rohlena, K. Jungwirth, J. Ullschmied, A. Lorusso, L. Velardi, V. Nassisi, **A. Czarnecka**, L. Ryć, P. Parys, and J. Wołowski, 2010, **Emission characteristics and stability of laser ion sources**, Vacuum 85, 617-621

- [B55] J. Krasa, L. Laska, K. Rohlena, Velyhan, **A. Czarnecka**, P. Parys, L. Ryc, J. Wolowski, 2010, **Limits of applicability of time-of-flight ion-mass analyzer to uncovering partial currents of ions emitted by pulsed laser ion sources**, Radiation Effects and Defects in Solids 165, 441
- [B56] M. Gryaznevich, G. Van Oost, P. Peleman, J. Brotankova, R. Dejarnac, E. Dufkova, I. D'uran, M. Hron, J. Sentkerestiova, J. Stockel, V. Weinzettl, J. Zajac, L. A. Berni, E. Del Bosco, J. G. Ferreira, F. J. R. Simoes, M. Berta, D. Dunai, B. Tal, S. Zoletnik, A. Malaquias, G. Mank, H. Figueiredo, Y. Kuznetsov, L. Ruchko, H. Hegazy, A. Ovsyannikov, E. Sukhov, G.M. Vorobjev, N. Dreval, A. Singh, V. Budaev, G. Kirnev, N. Kirneva, B. Kuteev, A. Melnikov, D. Nurov, M. Sokolov, V. Vershkov, A. Talebitaher, P. Khorshid, R. Gonzales, I. El. Chama Neto, A. W. Kraemer-Flecken, V. Soldatov, B. Brotas, P. Carvalho, R. Coelho, A. Duarte, H. Fernandes, J. Figueiredo, A. Fonseca, R. Gomes, I. Nedzelski, A. Neto, G. Ramos, J. Santos, C. Silva, D. Valcarcel, C.R. Gutierrez Tapia, L. I. Krupnik, L. Petrov, M. Kolokoltsov, J. Herrera, M. Nieto-Perez, **A. Czarnecka**, P. Balan, A. Sharnin and V. Pavlov, 2009, **Results of Joint Experiments and other IAEA activities on research using small Tokamaks**, Nuclear Fusion 49, 104026
- [B57] F. Romanelli, R. Kamendje, (**A. Czarnecka**), et al., 2009, **Overview of JET results**, Nuclear Fusion 49, 104006
- [B58] **A. Czarnecka**, J. Badziak, P. Parys, M. Rosiński, J. Wołowski, 2008, **Method of ions acceleration for laser-induced implantation of semiconductor materials**, Radiation Effects & Defects in Solids 163, 389-394
- [B59] J. Wołowski, J. Badziak, **A. Czarnecka**, P. Parys, M. Pisarek, M. Rosiński, R. Turan, S. Yerci, 2008, **Applications of ions produced by low intensity repetitive laser pulses for implantation into semiconductor materials**, Radiation Effects & Defects in Solids 163, 589-595J
- [B60] L. Giuffrida, L. Torrisi, **A. Czarnecka**, J. Wołowski, G. Quarta, L. Calcagnile, A. Lorusso, V. Nassisi, 2008, **Ge laser-generated plasma for ion implantation**, Radiation Effects & Defects in Solids 163, 401-409
- [B61] J. Krása, L. Láska, K. Rohlena, A. Velyhan, A. Lorusso, V. Nassisi, **A. Czarnecka**, P. Parys, L. Ryc, and J. Wolowski, 2008, **Effects of 2 mass % Si admixture in a laser-produced Fe plasma**, Applied Physics Letters 93, 191503
- [B62] J. Wolowski, J. Badziak, **A. Czarnecka**, P. Parys, M. Pisarek, M. Rosinski, R. Turan and S. Yerci, (2007), **Application of pulsed laser deposition and laser-induced ion implantation for formation of semiconductor nano-crystalinities**, Laser and Particle Beams 25, 65
- [B63] M. Rosiński, J. Badziak, **A. Czarnecka**, P. Gasior, P. Parys, M. Pisarek, R. Turan, J. Wołowski, S. Yerci, 2006, **Implantation and sputtering of Ge ions into SiO₂ substrates with the use of Ge ions produced by repetitive laser pulses**, Materials Science in Semiconductor Processing 9, 655
- [B64] J. Wolowski, J. Badziak, F. P. Boody, **A. Czarnecka**, S. Gammino, S. Jabłoński, J. Krasa, L. Laska, P. Parys, K. Rohlena, M. Rosinski, L. Ryc, L. Torrisi and J Ullschmied, 2006, **Generation of fast highly charged ions in laser-plasma interaction**, Plasma Physics Control. Fusion 48, 12B, B475-B482

- [B65] P. Gąsior, J. Badziak, **A. Czarnecka**, P. Parys, J. Wołowski, M. Rosiński, M. Rubel, V. Philipps, 2006, **Characterization of laser-irradiated co-deposited layers on plasma facing components from a tokamak**, Physica Scripta T123, 99
- [B66] A.V. Tsarenko, A.K. Marchenko, M. J. Sadowski, E. Skladnik-Sadowska, K. Malinowski, J. Wołowski, **A. Czarnecka**, P. Gąsior, P. Parys, M. Rosinski, 2006, **Analysis of tungsten spectral-lines recorded from laser-target experiment**, Problems of Atomic Science and Technology, No 6 Series: Plasma Physics 12, 150
- [B67] P. Gąsior, **A. Czarnecka**, P. Parys, M. Rosinski, J. Wołowski, J. Hoffman, Z. Szymanski, V. Philipps, M. Rubel, 2006, **Effective laser-induced removal of co-deposited layers from plasma-facing components in a tokamak**, Czechoslovak Journal of Physics D 56, D1
- [B68] M. J. Sadowski, E. Skladnik-Sadowska, K. Malinowski, J. Wołowski, **A. Czarnecka**, P. Gąsior, P. Parys, M. Rosinski, A.V. Tsarenko, A.K. Marchenko, 2006, **Observation of tungsten spectral lines during interaction of laser beam with tungsten target**, Czechoslovak Journal of Physics B, 56, B550
- [B69] J. Wołowski, J. Badziak, **A. Czarnecka**, F. P. Boody, S. Gammino, J. Kràsa, L. Laska, A. Mezzasalma, P. Parys, M. Rosiński, K. Rohlena, L. Torrisi and J. Ullschmied, 2005, **Characteristics of laser-produced Ge ion fluxes used for modification of semiconductor materials**, Radiation Effects & Defects in Solids 160, 477

7.2 Publikacje naukowe w czasopismach międzynarodowych lub krajowych innych niż znajdujące się w bazie JCR

- [C1] L. Colas, P. Jacquet, V. Bobkov, M. Brix, L. Meneses, K. Kirov, E. Lerche, C.C. Klepper, M. Goniche, A. Křivská, P. Dumortier, **A. Czarnecka** and JET contributors, 2018, **2D mappings of ICRF-induced SOL density modifications on JET**, 45th European Physical Society (EPS) Conference on Plasma Physics, EPS2018, ECA Vol. 42A, O4.101
- [C2] M. Goniche, P. Buratti, R. J. Dumont, C. Challis, **A. Czarnecka**, J. Graves, P. Jacquet, V. Kiptily, E. Lerche, M. Mantsinen, T. Pütterich, D. Van Eester and JET Contributors, 2018, **Role of MHD activity triggered by fast ions in tungsten transport in JET hybrid discharges**, 45th European Physical Society (EPS) Conference on Plasma Physics, EPS2018, ECA Vol. 42A, P4.1057
- [C3] N. Tamura, C. Suzuki, H. Funaba, K. Mukai, Y. Yoshinuma, K. Ida, T. Fornal, **A. Czarnecka**, M. Kubkowska, and LHD Experiment Group, 2018, **Initial Results on Impact of Background Hydrogen Isotope on Impurity Behavior in the EC-heated LHD plasmas**, 45th European Physical Society (EPS) Conference on Plasma Physics, EPS2018, ECA Vol. 42A, P5.1079
- [C4] L. Garzotti, C. Challis, R. Dumont, D. Frigione, J. Graves, E. Lerche, J. Mailloux, M. Mantsinen, F. Rimini, F. Casson, **A. Czarnecka**, J. Eriksson, R. Felton, L. Frassinetti, D. Gallart, J. Garcia, C. Giroud, E. Joffrin, H.-T. Kim, N. Krawczyk, M. Lennholm, P. Lomas, C. Lowry, L. Meneses, I. Nunes, M. Romanelli, S. Sharapov, S. Silburn, A. Sips, E. Stefaníková, M. Tsalas, D. Valcarcel, M. Valovič and JET contributors, 2018, **Scenario development for DT operation at JET**, 27th IAEA Fusion Energy Conference, Ahmedabad, India, EX/3-6, https://conferences.iaea.org/indico/event/151/papers/5810/files/4782-Paper_IAEA_2018_V5.pdf

- [C5] G. Telesca, I. Ivanova-Stanik, R. Zagórski, S. Brezinsek, P. J. Carvalho, **A. Czarnecka**, C. Giroud, A. Huber, E. A. Lerche and S. Wiesen, 2018, **Numerical Simulation of High Neutron Rate JET-ILW DD Pulses in View of Extension to DT Experiments**, 27th IAEA Fusion Energy Conference, Ahmedabad, India, TH/P6-24, https://conferences.iaea.org/indico/event/151/papers/5839/files/4667-Telesca_IAEA_Paper_TH_P6-24_final.pdf
- [C6] T. Tala, S. Mordijck, H. Nordman, A. Salmi, C. Bourdelle, J. Citrin, **A. Czarnecka**, F. Eriksson, E. Fransson, C. Giroud, J. Hillesheim, A. Hubbard, J.W. Hughes, C. Maggi, P. Mantica, A. Marioni, M. Maslov, G. McKee, L. Meneses, S. Menmuir, V. Naulin, M. Oberparleiter, T. Rhodes, G. Sips, A. Skyman, D. Tegnered, M. Tsalas, E. Tolman, H. Weisen and JET contributors, 2018, **Core Density Peaking Experiments in JET, DIII-D and C-Mod in Various Operational Scenarios - Driven by Fuelling or Transport?**, 27th IAEA Fusion Energy Conference, Ahmedabad, India, EX/4-4, https://conferences.iaea.org/indico/event/151/papers/5613/files/4915-IAEA_paper_Tala.pdf
- [C7] S. Nowak, O. Sauter, D. Yadykin, E. Alessi, D. Brunetti, **A. Czarnecka**, V. Fusco, G. Miron, G. Pucella, I. Ivanova-Stanik, G. Vlad, M. Baruzzo, P. Buratti, R. Coelho, G. Falchetto⁹, E. Giovannozzi, J. Graves, P. Huynh, M. Imrisek, J. Ferreira, E. Joffrin, D. Kalupin, F. Koechl, N. Krawczyk, E. Lazzaro, J. Mailloux, C. Marchetto, A. Merle, F. Poli¹, M. Romanelli, P. Strand, R. Zagorski, JET contributors and the EUROfusion-IM Team, 2018, **Analysis and Modelling of NTMs Dynamics in JET Discharges Using the European Transport Simulator (ETS) and Integrated Modelling Tools**, 27th IAEA Fusion Energy Conference, Ahmedabad, India, TH/P6-26, https://conferences.iaea.org/indico/event/151/papers/6039/files/4878-64930_snowak_iaea2018_paper_final_rev.pdf
- [C8] Ye.O. Kazakov, J. Ongena, R. Bilato, V. Bobkov, J.M. Faustin, A. Kappatou, V.G. Kiptily, E. Lerche, M. Mantsinen, M. Nocente, M. Schneider, D. van Eester, M. Weiland, H. Weisen, y. Baranov, J. Galdon-Quiroga, M. Garcia-Munoz, J. Gonzalez-Martin, K. Kirov, J. Bielecki, S.A. Bozhnikov, A. Cardinali, C. Castaldo, T. Craciunescu, K. Crombé, **A. Czarnecka**, R. Dumont, P. Dumortier, F. Durodié, J. Eriksson, R. Felton, M. Fitzgerald, D. Gallart, L. Giacomelli, C. Giroud, M. Goniche, J. Graves, C. Hellesen, P. Jacquet, T. Johnson, N. Krawczyk, M. Lennholm, T. Loarer, S. Menmuir, I Monakhov, F. Nabais, M. F. F. Nave, J.-M. Noterdaeme, R. Ochoukov, H. Patten, M. Porkolab, P. Schneider, S. E. Sharapov, D. Valcarcel, M. van Schoor, J. C. Wright, S. J. Wukitch, JET contributors*, the ASDEX Upgrade team, the eurofusion mst1 team, 2018, **Recent Advances in ICRF Heating of Mixture Plasmas: Survey of JET and AUG Experiments and Extrapolation to JET-DT and ITER**, 27th IAEA Fusion Energy Conference, Ahmedabad, India, EX/8-1, <https://conferences.iaea.org/indico/event/151/papers/5659/files/4827-Kazakov-IAEA-FEC2018-paper-v5.pdf>
- [C9] F. J. Casson, H. Patten, C. Bourdelle, S. Breton, J. Citrin, F. Koechl, C. Angioni, Y. Baranov, R. Bilato, E. Belli, C. D. Challis, G. Corrigan, **A. Czarnecka**, O. Ficker, L. Garzotti¹, M. Goniche, J.P. Graves, T. Johnson, K. Kirov, P. Knight, E. Lerche, M. Mantsinen, J. Mylnar, M. Sertoli, M. Valisa, and JET contributors, 2018, **Predictive multi-channel flux-driven modelling to optimise icrh tungsten control in JET**, 27th IAEA Fusion Energy Conference, Ahmedabad, India, TH/3-2,

https://conferences.iaea.org/indico/event/151/papers/6118/files/4766-Casson_IAEA_2018_4.pdf

- [C10] D. Gallart Escola, M.J. Mantsinen, C. Challis, D. Frigione, J. Graves, J. Hobirk, E. Belonohy, **A. Czarnecka**, J. Eriksson, M. Goniche, C. Hellesen, P. Jacquet, E. Joffrin, N. Krawczyk, D. King, M. Lennholm, E. Lerche, E. Pawelec, A. C. C. Sips, E. Solano, M. Tsalas, M. Valisa and JET Contributors, 2017, **Modelling of combined ICRF and NBI Heating in JET Hybrid**, EPJ Web of Conferences 157, 03015
- [C11] M. J. Mantsinen, C. Challis, D. Frigione, J. Graves, J. Hobirk, E. Belonohy, **A. Czarnecka**, J. Eriksson, D. Gallart, M. Goniche, C. Hellesen, P. Jacquet, E. Joffrin, N. Krawczyk, D. King, M. Lennholm, E. Lerche, E. Pawelec, A.C.C. Sips, E. Solano, M. Tsalas, M. Valisa and JET Contributors, 2017, **The Role of Combined ICRF and NBI Heating in JET Hybrid Plasmas in Quest for High D-T Fusion Yield**, EPJ Web of Conferences 157, 03032
- [C12] P. Jacquet, D. Van Eester, E. Lerche, V. Bobkov, Y. Kazakov, M. Goniche, T. Blackman, I. Monakhov, P. Dumortier, F. Durodier, C. Klepper, W. Zhang, **A. Czarnecka**, L. Colas, M. Reinke, J. Ongena. M. Mantsinen and JET contributors, 2017, **Recent ICRH Physics and technology achievements in JET**, EPJ Web of Conferences 157, 02004
- [C13] J. Ongena, Ye. O. Kazakov, Y. Baranov, C. Hellesen, J. Eriksson, T. Johnson, V. G. Kiptily, M. J. Mantsinen, M. Nocente, R. Bilato, A. Cardinali, C. Castaldo, K. Crombé, **A. Czarnecka**, R. Dumont, J. Faustin. L. Giacomelli, V. Goloborodko, J. Graves, Ph. Jacquet, N. Krawczyk, E. Lerche, L. Meneses, M. F. F. Nave, H. Patten, M. Schneider, D. Van Eester, H. Weisen, J. C. Wright and JET Contributors, 2017, **Synergetic heating of D-NBI ions in the vicinity of the mode conversion layer in H-D plasmas in JET with the ITER like wall**, EPJ Web of Conferences 157, 02006
- [C14] D. Van Eester, E. Lerche, Y. Kazakov, P. Jacquet, Y. Baranov, V. Bobkov, K. Crombé, **A. Czarnecka**, R. Dumont, P. Dumortier, J. Eriksson, L. Giacomelli, C. Giroud, M. Goniche, C. Hellesen, V. Kiptily, T. Koskela, F. Nave, M. Nocente, J. Ongena, M. Santala, M. Salewski, M. Schneider, H. Weisen, 2017, **Recent H majority inverted radio frequency heating scheme experiments in JET-ILW**, EPJ Web of Conferences 157, 03061
- [C15] C. D. Challis, E. Belonohy, A. Czarnecka, D. Frigione, C. Giroud, J. Graves, J. Hobirk, A. Huber, E. Joffrin, N. Krawczyk, M. Mantsinen, K. McClements, T. O’Gorman, S. Silburn, A. Sips, E. Solano and JET Contributors, 2017, **Impact of neon seeding on fusion performance in JET ILW hybrid plasmas**, 44th European Physical Society (EPS) Conference on Plasma Physics, EPS2017, ECA Vol. 41F, P2.153
- [C16] M. J. Mantsinen, D. Gallart, E. Belonohy, C. Challis, **A. Czarnecka**, J. Eriksson, D. Frigione, J. Graves, M. Goniche, C. Hellesen, J. Hobirk, P. Jacquet, E. Joffrin, D. King, N. Krawczyk, M. Lennholm, E. Lerche, E. Pawelec, A. C. C. Sips, E. Solano, M. Tsalas, M. Valisa and JET Contributors, 2017, **Optimising the Use of ICRF waves in JET Hybrid Plasmas for High Fusion Yield**, 44th European Physical Society (EPS) Conference on Plasma Physics, EPS2017, ECA Vol. 41F, O3.110
- [C17] J. Mailloux, R. Dumont, V. Aslanyan, M. Baruzzo, C. D. Challis, I. Coffey, **A. Czarnecka**, E. Delabie, J. Eriksson, J. Ferreira, M. Fitzgerald, L. Giacomelli, C. Giroud, N. Hawkes, P. Jacquet, E. Joffrin, T. Johnson, D. Keeling, D. King, V. Kiptily, B. Lomanowski, E. Lerche, M. Mantsinen, S. Menmuir, K. Mc Clements, S. Moradi, M. Nocente, A. Patel, H. Patten, P.

- Puglia, R. Scannel, S. Sharapov, E. Solano, M. Tsalas, P. Vallejos, H. Weisen and JET contributors, 2017, **Plasma preparation for α -particle excitation of TAEs in JET DT plasmas**, 44th European Physical Society (EPS) Conference on Plasma Physics, EPS2017, ECA Vol. 41F, O3.109
- [C18] T. Tala, H. Nordman, A. Salmi, D. Tegnered, C. Bourdelle, P. Carvalho, **A. Czarnecka**, L. Giacomelli, C. Giroud, E. Belonohy, J. Hillesheim, C. Maggi, P. Mantica, M., Maslov, L. Meneses, S. Menmuir, S. Mordijck, V. Naulin, J. Juul Rasmussen, G. Sips, M. Tsalas, H. Weisen and JET contributors, 2017, **Four Separate Dimensionless Collisionality Scans in various JET Scenarios**, 44th European Physical Society (EPS) Conference on Plasma Physics, EPS2017, ECA Vol. 41F, P4.135
- [C19] D. Van Eester, E. Lerche, Y. Kazakov, P. Jacquet, V. Bobkov, **A. Czarnecka**, R. Dumont, J. Eriksson, L. Giacomelli, C. Giroud, M. Goniche, C. Hellesen, V. Kiptily, T. Koskela, M. Nocente, M. Santala, M. Schneider, H. Weisen and JET contributors, 2016, **Recent ion cyclotron resonance heating experiments in JET in preparation of a DT campaign**, 26th IAEA Fusion Energy Conference, Kyoto, Japan, EX/P6-10, <https://nucleus.iaea.org/sites/fusionportal/Shared%20Documents/FEC%202016/fec2016-preprints/preprint0261.pdf>
- [C20] A. Dinklage, A. Alonso, J. Baldzuhn, C. D. Beidler, C. Biedermann, B. Blackwell, S. Bozhentkov, R. Brakel, B. Buttenschön, Y. Feng, G. Fuchert, J. Geiger, P. Helander, M. Hirsch, U. Hoefel, J. Knauer, A. Krämer-Flecken, M. Landreman, A. Langenberg, H. P. Laqua, H. Maaßberg, N.A. Pablant, E. Pasch, K. Rahbarnia, L. Rudischhauser, H. Smith, T. Stange, L. Stephey, H. Trimino-Mora, Yu. Turkin, J. -L. Velasco, G. Wurden, D. Zhang, T. Andreeva, M. Beurskens, E. Blanco, H.-S. Bosch, R. Burhenn, A. Cappa, **A. Czarnecka**, M. Dostal, P. Drews, M. Endler, T. Estrada, T. Fornal, O. Grulke, D. Hartmann, J. H. Harris, M. Jakubowski, T. Klinger, S. Klose, G. Kocsis, R. König, P. Kornejew, N. Krawczyk, M. Krychowiak, M. Kubkowska, I. Ksiazek, S. Lazerson, Y. Liang, S. Liu, O. Marchuk, S. Marsen, N. Marushchenko, V. Moncada, D. Moseev, D. Naujoks, H. Niemann, M. Otte, T. S. Pedersen, F. Pisano, K. Riße, T. Rummel, O. Schmitz, S. Satake, T. Schröder, T. Szepesi, H. Thomsen, P. Traverso, H. Tsuchiya, P. Valson, N. Wang, T. Wauters, G. Weir, R. Wolf, M. Yokoyama and the W7-X Team, 2016, **Core Confinement in Wendelstein 7-X Limiter Plasmas**, 43rd European Physical Society (EPS) Conference on Plasma Physics, EPS2016, ECA Vol.40A, O2.107
- [C21] B. Buttenschön, R. Burhenn, M. Kubkowska, **A. Czarnecka**, T. Fornal, N. Krawczyk, D. Zhang, N. Pablant, A. Langenberg, P. Valson, H. Thomsen, W. Biel, J. Aßmann, the Wendelstein 7-X team, 2016, **Spectroscopic impurity survey in the first operation phase of Wendelstein 7-X**, 43rd European Physical Society (EPS) Conference on Plasma Physics, EPS2016, ECA Vol.40A, P4.012
- [C22] D. Zhang, R. Burhenn, B. Buttenschön, R. König, R. Laube, H. Jenzsch, L. Giannone, M. Marquardt, H. Thomsen, A. Werner, A. Alonso, Ch. Biedermann, S. Bozhentkov, R. Brakel, **A. Czarnecka**, T. Fornal, G. Fuchert, O. Grulke, M. Hirsch, J. Knauer, M. Kubkowska, A. Langenberg, H. P. Laqua, M. Otte, N. Pablant, E. Pasch, K. Rahbarnia, T. Schröder, J. Svensson, U. Wenzel, G.A. Wurden, and the W7-X team, 2016, **Investigation of the radiative power loss in the limiter plasmas of W7-X**, 43rd European Physical Society (EPS) Conference on Plasma Physics, EPS2016, ECA Vol.40A, P4.015
- [C23] M. F. F. Nave, J. Bernardo, R. Coelho, **A. Czarnecka**, A. Figueiredo, C. Giroud, J. Hillesheim, V. Parail, A. Salmi, K. -D. Zastrow and JET Contributors, 2015, **Measuring**

Intrinsic Rotation in the JET tokamak, 42nd European Physical Society (EPS) Conference on Plasma Physics, EPS2015, ECA Vol. 39E, P2.124

- [C24] E. Lerche, M. Goniche, P. Jacquet, D. Van Eester, V. Bobkov, L. Colas, I. Monakhov, F. Rimini, **A. Czarnecka**, K. Crombé, R. Dumont, J. Hobirk, Y. Kazakov, M.-L. Mayoral, L. Meneses, J. Mlynar, C. Noble, I. Nunes, J. Ongena, V. Petržilka, M. Reich, M. Santala, A. Shaw, M. Tsalias and JET Contributors, 2015, **ICRH for core impurity mitigation in JET-ILW**, AIP Conference Proceedings, 1689, 030002
- [C25] V. Bobkov, Ph. Jacquet, R. Ochoukov, W. Zhang, R. Bilato, F. Braun, D. Carralero, L. Colas, **A. Czarnecka**, R. Dux, H. Faugel, H. Fünfgelder, J. Jacquot, A. Křivská, T. Lunt, D. Milanesio, R. Maggiore, O. Meyer, I. Monakhov, J.-M. Noterdaeme, S. Potzel, Th. Pütterich, I. Stepanov and the ASDEX Upgrade Team, 2015, **Progress in Controlling ICRF-edge Interactions in ASDEX Upgrade**, AIP Conference Proceedings, 1689, 030004
- [C26] M. Goniche, E. Lerche, P. Jacquet, D. Van Eester, V. Bobkov, S. Brezinsek, L. Colas, **A. Czarnecka**, P. Drewelow, R. Dumont, N. Fedorczak, C. Giroud, M. Graham, J. P. Graves, I. Monakhov, P. Monier-Garbet, C. Noble, T. Pütterich, F. Rimini, M. Valisa and JET EFDA contributors, 2014, **Optimization of ICRH for Tungsten Control in JET H-Mode**, 41nd European Physical Society (EPS) Conference on Plasma Physics, EPS2014, ECA Vol. 38F O4.129
- [C27] D. Van Eester, E. Lerche, P. Jacquet, V. Bobkov, **A. Czarnecka**, L. Colas, K. Crombé, R. Dumont, G. Ericsson, J. Eriksson, C. Giroud, M. Goniche, M. Graham, V. Kiptily, J. Ongena, T. Pütterich, F. Rimini, M. Santala and JET EFDA contributors, 2014, **Minority Ion Cyclotron Resonance Heating in H-Mode in Presence of the ITER-Like Wall in JET**, 41st European Physical Society (EPS) Conference on Plasma Physics, EPS2014, ECA Vol.38F, P1.002
- [C28] D. Van Eester, E. Lerche, P. Jacquet, V. Bobkov, **A. Czarnecka**, J. W. Coenen, L. Colas, K. Crombe, M. Graham, S. Jachmich, E. Joffrin, C. C. Klepper, F. Marcotte, M. -L. Mayoral, I. Monakhov, F. Nave, J. Ongena, T. Pütterich, F. Rimini, G. van Rooij, 2014, **Effect of the minority concentration on ion cyclotron resonance in presence of the ITER-like wall in JET**, AIP Conference Proceedings 1580, 223-226
- [C29] E. Lerche, D. Van Eester, P. Jacquet, M.-L. Mayoral, V. Bobkov, L. Colas, **A. Czarnecka**, G. Matthews, I. Monakhov, R. Neu, F. Rimini, 2014, **Statistical analysis of the ICRF and NBI heating performances in l-mode plasmas at JET**, AIP Conference Proceedings 1580, 235-238
- [C30] M. -L. Mayoral, P. Jacquet, E. Lerche, D. Van-Eester, V. Bobkov, C. Bourdelle, L. Colas, **A. Czarnecka**, J. Mlynar, R. Neu, 2014, **Comparison of ICRF and NBI heated plasmas performance in the JET ITER-like wall**, AIP Conference Proceedings 1580, 231-234
1 cytowanie (Scopus), 1 cytowanie (WoS)
- [C31] P. Jacquet, V. Bobkov, L. Colas, **A. Czarnecka**, M. Graham, E. Lerche, M. -L. Mayoral, I. Monakhov, D. Van-Eester, 2014, **ICRF heating in JET during initial operations with the ITER-like wall**, AIP Conference Proceedings 1580, 65-72
- [C32] V. Bobkov, R. Bilato, L. Colas, **A. Czarnecka**, R. Dux, H. Faugel, P. Jacquet, A. Kallenbach, I. Monakhov, H. W. Mueller, J. -M. Noterdaeme, S. Potzel, Th. Puetterich, I. Stepanov, W. Suttrop, ASDEX Upgrade team, 2014, **Influence of Gas Injection Location**

and Magnetic Perturbations on ICRF Antenna Performance in ASDEX Upgrade, AIP Conference Proceedings 1580, 271-274

- [C33] **A. Czarnecka**, V. Bobkov, I. H. Coffey, P. Jacquet, C. C. Klepper, K. D. Lawson, E. Lerche, C. F. Maggi, M.-L. Mayoral, T. Pütterich, D. Van Eester and JET EFDA contributors, 2012, **Impurity behaviour during ICRH and NBI operation with ITER-like wall at JET**, 39th European Physical Society (EPS) Conference on Plasma Physics, EPS2012, ECA Vol. 36F, P5.047
- [C34] F. Maggi, G. Calabro, E. Delabie, M. Groth, N. C. Hawkes, M. Lehnen, E. de la Luna, K. McCormick, F. Militello, C. Reux, F. Rimini, E. R. Solano, V. Bobkov, M. Brix, **A. Czarnecka**, J. Flanagan, E. Lerche, S. Marsen, I. Nunes, B. Sieglin, D. Van Eester and JET EFDA contributors, 2012, **The H-mode Threshold in JET with the ITER-like Wall**, 39th European Physical Society (EPS) Conference on Plasma Physics, EPS2012, ECA Vol. 36F, O3.108
- [C35] D. Van Eester, E. Lerche, P. Jacquet, V. Bobkov, **A. Czarnecka**, J. W. Coenen, L. Colas, K. Crombé, M. Graham, S. Jachmich, E. Joffrin, C. C. Klepper, V. Kiptily, M. Lehnen, C. Maggi, F. Marcotte, G. Matthews, M. -L. Mayoral, K. Mc Cormick, I. Monakhov, M. F. F. Nave, R. Neu, C. Noble, J. Ongena, T. Pütterich, F. Rimini, G. van Rooij and JET EFDA contributors, 2012, **Characterization of Ion Cyclotron Resonance Heating in presence of the ITER-like wall in JET**, 39th European Physical Society (EPS) Conference on Plasma Physics, EPS2012, ECA Vol. 36F P1.094
- [C36] T. Pütterich, R Dux, M.N.A. Beurskens , V. Bobkov, S. Brezinsek, J. Bucalossi, J. W. Coenen, I. Coffey, **A. Czarnecka**, C. Giroud, E. Joffrin, K. D. Lawson , M. Lehnen, E. de la Luna, J. Mailloux, S. Marsen, M. -L. Mayoral, A Meigs, R. Neu, F. Rimini, M. Sertoli, M. Stamp, G. van Rooij and JET EFDA Contributors, 2012, **Screening of the W Divertor Source and Impurity Control in JET**, 24th IAEA Fusion Energy Conference, San Diego, USA, IAEA-CN-197/EX/P3-15, http://www-naweb.iaea.org/napc/physics/FEC/FEC2012/papers/193_EXP315.pdf
- [C37] S. Jabłoński, **A. Czarnecka**, W. Figacz, M. Kubkowska, J. Kaczmarczyk, L. Ryć, J. Wołowski, 2012, **1-D plasma X-ray radiation code as a first step for developing the fusion diagnostics**, 39th European Physical Society (EPS) Conference on Plasma Physics, EPS2012, ECA Vol. 36F P2.048

PUBLIKACJE, KTÓRE UKAZAŁY SIĘ PRZED UZYSKANIEM TUTUŁU DOKTORA

- [C38] **A. Czarnecka**, M. Kubkowska, W. Figacz, S. Jabłoński, J. Kaczmarczyk, J. Wołowski, C. Biedermann, R. Burhenn, R. König, A. Weller, 2011, **Concept of pulse height analysis system (PHA) for Wendelstein 7-X**, 38th European Physical Society (EPS) Conference on Plasma Physics, EPS2011, ECA Vol. 35G, P1.052
- [C39] E. Lerche, D. Van Eester, M. -L. Mayoral, J. Ongena, V. Bobkov, L. Colas, **A. Czarnecka**, F. Durodié, M. Graham, T. Hellsten, T. Johnson, P. Jacquet, V. Kiptily, P. Lamalle, M. Laxåback, I. Monakhov, M. Nightingale, F. Rimini and JET EFDA Contributors, 2011, **Optimizing ICRF heating for ITER: Dedicated experiments on JET**, 38th European Physical Society (EPS) Conference on Plasma Physics, EPS2011, ECA Vol. 35G I5.012
- [C40] E. Lerche, D. Van Eester, J. Ongena, M.-L. Mayoral, T. Johnson, T. Hellsten, R. Bilato, **A. Czarnecka**, R. Dumont, C. Giroud, P. Jacquet, V. Kiptily, A. Krasilnikov, M. Maslov, V.

- Vdovin and JET, EFDA Contributors, 2011, **ICRF scenarios for ITER's half-field phase**, AIP Conf. Proc. 1406, 245-252
- [C41] D. Van Eester, E. Lerche, T. Johnson, T. Hellsten, J. Ongena, M. -L. Mayoral, D. Frigione, C. Sozzi, G. Calabro, M. Lennholm, P. Beaumont, T. Blackman, D. Brennan, A. Brett, M. Ceconello, I. Coffey, A. Coyne, K. Crombe, **A. Czarnecka**, R. Felton, M. Gatu Johnson, C. Giroud, G. Gorini, C. Hellesen, P. Jacquet, Y. Kazakov, V. Kiptily, S. Knipe, A. Krasilnikov, Y. Lin, M. Maslov, I. Monakhov, C. Noble, M. Nocente, L. Pangioni, I. Proverbio, M. Stamp, W. Studholme, M. Tardocchi, T. W. Versloot, V. Vdovin, A. Whitehurst, E. Wooldridge, V. Zoita and JET EFDA Contributors, 2011, **Enhancing the mode conversion efficiency in JET plasmas with multiple mode conversion layers**, AIP Conf. Proc. 1406, 301-308
- [C42] F. Durodie, I. Monakhov, M. Nightingale, M. -L. Mayoral, A. Argouarch, G. Berger-By, T. Blackman, V. Cocilovo, **A. Czarnecka**, S. Dowson, D. Frigione, R. Goulding, M. Graham, J. Hobirk, S. Huygen, S. Jachmich, P. Jacquet, E. Lerche, T. Loarer, R. Maggiora, A. Messiaen, D. Milanesio, M.F.F. Nave, J. Ongena, F. Rimini, H. Sheikh, C. Sozzi, M. Tsalas, D. Van Eester, M. Vrancken, A. Whitehurst, E. Wooldridge, K. D. Zastrow, and JET EFDA Contributors, 2010, **Latest Achievements of the JET ICRF Systems in View of ITER**, Proc. 23rd IAEA Fusion Energy Conference, Daejon, Republic of Korea, IAEA-CN-180/EXW/P7-04, https://www-pub.iaea.org/mtcd/meetings/PDFplus/2010/cn180/cn180_papers/exw_p7-04.p
- [C43] E. Lerche, D. Van Eester, T. Johnson, T. Hellsten, J. Ongena, M. -L. Mayoral, D. Frigione, C. Sozzi, G. Calabro, M. Lennholm, P. Beaumont, T. Blackman, D. Brennan, A. Brett, M. Ceconello, I. Coffey, A. Coyne, K. Crombe, **A. Czarnecka**, R. Felton, C. Giroud, G. Gorini, C. Hellesen, P. Jacquet, V. Kiptily, S. Knipe, A. Krasilnikov, M. Maslov, I. Monakhov, C. Noble, M. Nocente, L. Pangioni, I. Proverbio, M. Stamp, W. Studholme, M. Tardocchi, T. Versloot, V. Vdovin, A. Whitehurst, E. Wooldridge, V. Zoita and JET EFDA Contributors, 2010, **Potential of the ICRF Heating Schemes foreseen for ITER's Half-Field Hy-drogen Phase**, Proc. 23rd IAEA Fusion Energy Conference, Daejon, Republic of Korea, IAEA-CN-180/THW/P2-03, https://www-pub.iaea.org/MTCD/Meetings/PDFplus/2010/cn180/cn180_papers/thw_p2-03.pdf
- [C44] M. -L. Mayoral, V. Bobkov, L. Colas, M. Goniche, J. Hosea, J. G. Kwak, R. Pinsker, S. Moriyama, S. Wukitch, F. W. Baity, **A. Czarnecka**, A. Ekedahl, G. Hanson, P. Jacquet, P. Lamalle, I. Monakhov, M. Murakami, A. Nagy, M. Nightingale, J. M. Noterdaeme, J. Ongena, P. M. Ryan, M. Vrancken, J. R. Wilson, JET EFDA Contributors, and ASDEX Upgrade Team and the ITPA Integrated Operation Scenarios" Members and Experts, 2010, **On Maximizing the ICRF Antenna Loading for ITER Plasmas**, Proc. 23rd IAEA Fusion Energy Conference, Daejon, Republic of Korea, IAEA-CN-180/ITR/P1-11, https://www-pub.iaea.org/MTCD/Meetings/PDFplus/2010/cn180/cn180_papers/itr_p1-11.pdf
- [C45] **A. Czarnecka**, V. Bobkov, I. H. Coffey, L. Colas, A. C. A. Figueiredo, P. Jacquet, K. D. Lawson, E. Lerche, M. -L. Mayoral, J. Ongena, D. Van Eester, K.-D. Zastrow and JET-EFDA contributors, 2010, **Impurity production by the ICRF antennas in JET**, 37th European Physical Society (EPS) Conference on Plasma Physics, EPS2010, ECA Vol. 34A, P5.147
- [C46] E. Lerche, D. Van Eester, T. Johnson, T. Hellsten, J. Ongena, M. -L. Mayoral, D. Frigione, C. Sozzi, G. Calabro, M. Lennholm, P. Beaumont, T. Blackman, D. Brennan, A. Brett, M. Ceconello, I. Coffey, A. Coyne, K. Crombe, **A. Czarnecka**, R. Felton, C. Giroud, G. Gorini, C. Hellesen, P. Jacquet, V. Kiptily, S. Knipe, A. Krasilnikov, M. Maslov, I. Monakhov, C. Noble, M. Nocente, L. Pangioni, I. Proverbio, M. Stamp, W. Studholme, M. Tardocchi, T.

- Versloot, V. Vdovin, A. Whitehurst, E. Wooldridge, V. Zoita and JET EFDA Contributors, 2010, **Experimental investigation of ICRF heating scenarios for ITER's half-field phase performed in JET**, 37th European Physical Society (EPS) Conference on Plasma Physics, EPS2010, ECA Vol. 34A O4.121
- [C47] D. Van Eester, E. Lerche, T. Johnson, T. Hellsten, J. Ongena, M. -L. Mayoral, D. Frigione, C. Sozzi, G. Calabro, M. Lennholm, P. Beaumont, T. Blackman, D. Brennan, A. Brett, M. Cecconello, I. Coffey, A. Coyne, K. Crombe, A. Czarnecka, R. Felton, C. Giroud, G. Gorini, C. Hellesen, P. Jacquet, V. Kiptily, S. Knipe, A. Krasilnikov, M. Maslov, I. Monakhov, C. Noble, M. Nocente, L. Pangioni, I. Proverbio, M. Stamp, W. Studholme, M. Tardocchi, T. Versloot, V. Vdovin, A. Whitehurst, E. Wooldridge, V. Zoita and JET EFDA Contributors, 2010, **Mode conversion heating in JET plasmas with multiple mode conversion layers**, 37th European Physical Society (EPS) Conference on Plasma Physics, EPS2010, ECA Vol. 34A P5.163
- [C48] J. Wołowski, A. Czarnecka, P. Gąsior, M. Kubkowska, P. Parys, M. Rosiński, 2010, **Study of physics and applications of ions produced by medium intensity laser beam**, 37th European Physical Society (EPS) Conference on Plasma Physics, EPS2010, ECA Vol.34A P4.208
- [C49] J. Wołowski, A. Czarnecka, P. Gąsior, M. Kubkowska, P. Parys, V. Philipps, M. Rosiński, 2010, **Application of a plasma diagnostic methods to control the laser-induced removal of surface layer from tokamak materials**, Proc. International Conference on Plasma Diagnostics, Pont-à-Mousson, France, P10
- [C50] M. Kubkowska, A. Czarnecka, S. Jabłoński, J. Kaczmarczyk, L. Ryć, J. Wołowski, R. Koenig, A. Weller, 2010, **Prospects of soft x-ray diagnostics in the Stellarator Wendelstein 7-X**, Proc. International Conference on Plasma Diagnostics, Pont-à-Mousson, France, P42
- [C51] A. Czarnecka, J. Rzadkiewicz, K.-D. Zastrow, I. H. Coffey, K. D. Lawson, M.G. O'Mullane and JET EFDA contributors, 2009, **Determination of Ni Impurity Density on JET by VUV Emission Spectroscopy**, 36th European Physical Society (EPS) Conference on Plasma Physics, EPS2009, ECA Vol. 33E P2.146
- [C52] M. -L. Mayoral, J. Ongena, A. Argouarch, Yu. Baranov, T. Blackman, V. Bobkov, R. Budny, L. Colas, A. Czarnecka, L. Delpech, F. Durodié, A. Ekedahl, M. Gauthier, M. Goniche, R. Goulding, M. Graham, J. Hillairet, S. Huygen, Ph. Jacquet, T. Johnson, V. Kiptily, K. Kirov, M. Laxåback, E. Lerche, J. Mailloux, I. Monakhov, M. F. F Nave, M. Nightingale, V. Plyusnin, V. Petrzilka, F. Rimini, D. Van Eester, A. Whitehurst, E. Wooldridge, M. Vrancken, JET-EFDA Task Force H and JET EFDA contributors, 2009, **Overview of Recent Results on Heating and Current Drive in the JET Tokamak**, AIP Conf. Proc. 1187, 39-46
- [C53] C. Silva, H. Fernandes, C.A.F. Varandas, D. Alves, B.B. Carvalho, I. Carvalho, P. Carvalho, P.A. Carvalho, R. Coelho, A. Duarte, P. Duarte, H. Figueiredo, J. Figueiredo, J. Fortunato, R. Gomes, B. Gonçalves, I. Nedzelskij, A. Neto, T. Pereira, V. Plyusnin, D. Valcárcel, P. Balan, C. Ionita, R. Schrittwieser, J.B. Correia, V. Livramento, O. Lielausis, A. Klyukin, E. Platacis, A. Sharakovski, I. Tale, T. Lunt, M. Gryaznevich, G. Van Oost, M. Hron, A. Malaquias, N. Dreval, A. Melnikov, P. Khorshid, C. R GutierrezTapia, W. Sá, M. Kolokolov, A. Czarnecka, L. Jakubowski, J. Zebrowski, K. Malinowski, M.J. Sadowski, 2008, **Overview of Recent ISTTOK Results**, Proc. 22nd IAEA Fusion Energy Conference, Geneva, Switzerland, EX/P4-11, https://www-pub.iaea.org/MTCD/Meetings/FEC2008/ex_p4-11.pdf

- [C54] G. Van Oost, R.B. Gomes, M. Gryaznevich, H. Fernandes, C. Silva, A. Malaquias, **A. Czarnecka**, M. Dreval, P. Duarte, H. Figueiredo, C. Gutierrez-Tapia, P. Korshid, A. Melnikov, 2008, **Overview of results from the IAEA-CRP 3rd International Joint Experiment on the tokamak ISTTOK**, 35th European Physical Society (EPS) Conference on Plasma Physics, EPS2008, ECA Vol.32D, P-2.040
- [C55] J. Wołowski, J. Badziak, **A. Czarnecka**, P. Parys, M. Pisarek, M. Rosiński, 2008, **The laser-Produced plasma as a modern repetitive ion source for technological applications**, 35th European Physical Society (EPS) Conference on Plasma Physics, EPS2008, ECA Vol.32, P-1.127
- [C56] S. Jabłoński, **A. Czarnecka**, J. Kaczmarczyk, L. Ryć, J. Rządkiwicz, 2008, **Assessment of a 1-D, Multi-colour X-ray Imaging System for the MAST ST**, AIP Conference Proceedings 993, 171-174
- [C57] J. Wołowski, M. Rosiński, J. Badziak, **A. Czarnecka**, P. Parys, R. Turan, S. Yerci, 2008, **Modification of semiconductor materials with the use of plasma produced by low intensity repetitive laser pulses**, AIP Conference Proceedings 993, 383-386
- [C58] M. Rosinski, J. Wolowski, S. Yerci, P. Parys, R. Turan, J. Badziak, **A. Czarnecka**, P. Gasior, M. Pisarek, 2008, **Implantation and sputtering of Ge and Si ions into SiO₂ substrates using electric fields for acceleration and optimisation of laser-produced ion streams used for modification of semiconductor materials**, Materials Research Society Symposium Proceedings, 1054, pp. 38-43
- [C59] F. F. Nave, L. G. Erikson, T. Hellsten, K. D. Zastrow, B. Alper, Y. Andrew, R. Barnsley, J. Brzozowski, K. Crombe, **A. Czarnecka**, M. von Hellermann, J. Ongena, FET-EFDA contributors, 2007, **Toroidal Rotation in Ohmic and RF heated Plasmas**, 34th European Physical Society (EPS) Conference on Plasma Physics, EPS2007, ECA Vol.31F, P-4.158
- [C60] L. Ryć, S. Jabłoński, **A. Czarnecka**, P. Parys, J. Wołowski, 2007, **Application of simple commercial CCD cameras for imaging pulsed plasma x-ray sources**, 34th European Physical Society (EPS) Conference on Plasma Physics, EPS2007, ECA Vol.31F, P4.016L
- [C61] F. Caridi, L. Torrioni, D. Margarone, A. Borrielli, S. Gammino, A. Mangione, **A. Czarnecka**, 2007, **Characterization of laser-generated plasma by electrostatic mass quadrupole analyzer**, 34th European Physical Society (EPS) Conference on Plasma Physics, EPS2007, ECA Vol.31F, P5.004F
- [C62] J. Badziak, **A. Czarnecka**, P. Gasior, P. Parys, V. Philipps, M. Rosiński, M. Rubel, J. Wołowski, 2006, **Application of ion diagnostics to control the laser-induced removal of surface layer of a carbon substrate**, AIP Conference Proceedings 812, pp. 295-298.
- [C63] J. Wołowski, J. Badziak, **A. Czarnecka**, S. Gammino, J. Krasa, L. Laska, A. Mezzasalma, P. Parys, M. Pfeifer, K. Rohlena, M. Rosiński, L. Torrioni, J. Ullschmied, **Interaction of high-energy laser pulses with plasmas of different density gradients**, 32th European Physical Society (EPS) Conference on Plasma Physics, EPS2005, ECA ECA Vol. 29C, P4.177

8 Słowniczek skrótów i sformułowań specjalistycznych

ASDEX-Upgrade (*Axisymmetric Divertor Experiment*) - tokamak średniej wielkości, znajdujący się w Max Planck Institut für Plasmaphysik, Garching, Niemcy. Urządzenie to posiada podobną konfigurację pola magnetycznego jak układ JET lub budowany tokamak ITER.

Bootstrap current – prąd napędzany w plazmie na skutek neoklasycznej dyfuzji cząstek. Jest on proporcjonalny do ciśnienia plazmy. Może stanowić istotną część wypadkowego prądu plazmy, przez co wydłuża czas życia plazmy.

Boronizacja - zastosowanie związku zawierającego bor na wewnętrznej powierzchni komory próżniowej w urządzeniach termojądrowych. Warstwa boru wiąże tlen znajdujący się w plazmie. Boronizacja pomaga zmniejszeniu promieniowania zanieczyszczeń.

Czas utrzymywania plazmy (*confinement time*) – średni czas, w którym energia lub cząsteczki opuszczają plazmę.

Częstość cyklotronowa – naładowane cząstki w polu magnetycznym posiadają naturalne częstości kołowe obiegu cząstki w polu magnetycznym prostopadłym do płaszczyzny toru cząstki. W tokamaku elektrony posiadają częstość cyklotronową rzędu kilkudziesięciu GHz, a jony kilkudziesięciu MHz.

DEMO – wersja demonstracyjna komercyjnej elektrowni termojądrowej. Przewiduje się, że DEMO powstanie po uruchomieniu i przebadaniu tokamaka nowej generacji ITER. DEMO wytwarzałoby energię elektryczną na poziomie kilkuset MW i wykorzystywałoby wszystkie technologie niezbędne w urządzeniach komercyjnych.

Disruption – rodzaj niestabilności, która może rozwijać się w urządzeniach termojądrowych. Prowadzi do degradacji lub utraty utrzymywania plazmy i zerwania sznura plazmowego. Energia zgromadzona w plazmie jest raptownie odprowadzana do różnych podzespołów systemu (ściana komory plazmowej, cewek magnetycznych, itp.), co może powodować ich uszkodzenia.

Divertor – specjalny układ instalowany w komorze tokamaka dla lokalnej konfiguracji pola magnetycznego, która ma wpływ na brzeg utrzymywanej magnetycznie plazmy. Divertor zaprojektowany jest w celu lepszego odprowadzania zanieczyszczeń i helu (produkt reakcji syntezy) poza komorę plazmową.

DT – symboliczne określenie plazmy deuterowo-trytowej.

D-T – symboliczne określenie reakcja syntezy termojądrowej deuteru i trytu.

ECRH – (*Electron Cyclotron Resonance Heating*) metoda dodatkowego grzania plazmy poprzez rezonansową absorpcję energii. Metoda ta wykorzystuje radiowe fale elektromagnetyczne o częstotliwościach cyklotronowych elektronów (do 200 GHz).

ELM (*Edge Localised Mode*) – niestabilność pojawiająca się w plazmie brzegowej podczas wyładowań typu modu H w tokamakach z dywertorem. Periodyczny przepływ energii i cząstek, które uciekają z pola magnetycznego otaczającego plazmę i powodują utratę energii. Powoduje przejściową utratę ciepła i cząstek do dywertora, co może być szkodliwe. Małe ELM-y są przydatne do kontroli zanieczyszczeń i gęstości.

Fishbones – niestabilności magneto hydrodynamiczne w polu magnetycznym, których nazwa pochodzi od kształtu tych niestabilności (ości ryby) rysowanych w funkcji czasu. Obserwowane są, kiedy do grzania plazmy stosowane jest NBI.

GIM (*Gas Injection Module*) – skrót od nazwy wlotu gazu – urządzenia stosowane w układzie JET.

H-mode – mod H, „wysoki” reżim utrzymywania plazmy tokamakowej. Pojawia się, gdy plazma jest ogrzewana powyżej charakterystycznego progu mocy i wzrasta wraz ze wzrostem gęstości plazmy, pola magnetycznego i wymiarów układu. Wyładowanie w modzie H charakteryzuje się stromym gradientem temperatury na brzegach plazmy, występowaniem niestabilności ELM i około 100 % wzrostem czasu utrzymywania energii plazmy w porównaniu do wyładowania w modzie L. Zjawisko to zostało po raz pierwszy odkryte w układzie ASDEX w 1982 r.

ICF (*Inertial Confinement Fusion*) – jest to jedna z dwóch (obok MCF) głównych kierunków badań nad syntezą termojądrową, w której reakcje syntezy jądrowej są inicjowane przez kompresję i grzanie paliwa DT za pomocą laserów.

ICRH (*Ion Cyclotron Resonance Heating*) – metoda dodatkowego grzania plazmy poprzez rezonansową absorpcję energii. Metoda ta wykorzystuje radiowe fale elektromagnetyczne o częstotliwościach cyklotronowych jonów (20-50 MHz).

ILA (*ITER-like Antenna*) – antena do grzania ICRH zainstalowana w 2007 roku w układzie JET, także dla optymalizacji konstrukcji i działania systemu grzania ICRH w budowanym tokamaku ITER.

ILW (*ITER-like wall*) – od 2011 r. pierwsza ściana tokamaka JET, która stanowi kombinację berylu (Be) w głównej komorze próżniowej (nazywanej limiterem) i wolframu (W) w obszarze dywertora. Materiały te są przewidziane dla pierwszej ściany w ITER.

Iota - liczba przejść linii pola magnetycznego w kierunku poloidalnych przypadająca na jedno przejście w kierunku toroidalnym na powierzchni strumienia toroidalnego.

ITER – akronim pochodzący od łacińskiego słowa „droga”. Skrót pierwotnie oznaczał również International Thermonuclear Experimental Reactor - nazwa, która nie jest już używana). Międzynarodowy projekt badawczy, którego głównym zadaniem jest budowa największego tokamaka ITER i zbadanie możliwości efektywnego produkowania energii z fuzji jądrowej. Układ ITER budowany jest w Cadarache na południu Francji.

ITPA (*International Tokamak Physics Activity*) - celem ITPA jest współpraca w zakresie rozwoju podstaw fizycznych dla fizyki plazmy tokamakowej, obejmująca projekty i zagadnienia szersze niż te reprezentowane przez ITER.

JET (*Joint European Torus*) – największy działający tokamak na świecie znajdujący się w Culham w Wielkiej Brytanii. Główna część programu naukowego poświęcona jest przygotowaniu do działania ITER.

Kolaps radiacyjny – w plazmie termojądrowej maksymalna osiągalna gęstość jest zasadniczo ograniczona z powodu wzrostu promieniowania zanieczyszczeń wraz ze wzrostem gęstości, co ostatecznie prowadzi do kolapsu. W tokamaku kolaps radiacyjny może powodować gwałtowne schłodzenie plazmy brzegowej, pojawienie się niestabilności MHD, a w konsekwencji do zerwania sznura plazmowego

Limiter – konstrukcja metalowa montowana na powierzchni komory próżniowej tokamaka, która określa brzeg plazmy. Chroni plazmę przed kontaktem ze ścianą komory.

L-mode – mod L, „niski” (normalny) reżim utrzymywania plazmy grzanej omowo lub przy pomocy zewnętrznego grzania. Charakteryzuje się słabym utrzymywaniem energii przez pole magnetyczne, w odróżnieniu od modu H.

MCF (*Magnetic Confinement Fusion*) - jest to jedna z dwóch (obok ICF) głównych kierunków badań dotyczących opanowania energii syntezy jądrowej. W tej metodzie wykorzystywane jest pole magnetyczne do utrzymywania plazmy termojądrowej, która jest grzana przepływem prądu, falami elektromagnetycznymi i strumieniami atomów (po neutralizacji wcześniej przyspieszanych jonów). Badania MCF realizowane są w toroidalnych pułapkach magnetycznych typu tokamak i stellarator.

MHD (*Magneto-Hydro-Dynamics*) – matematyczny opis plazmy w polu magnetycznego, który określa plazmę, jako przewodzący płyn.

NBI (*Neutral Beam Injection*) – metoda dodatkowego grzania plazmy poprzez wysokoenergetyczną wiązkę neutralnych atomów, zazwyczaj izotop wodoru, taki jak deuter, która jest wstrzykiwana do rdzenia plazmy. Energetyczne atomy przenoszą swoją energię do plazmy, podnosząc jej temperaturę.

Q - stosunek mocy wytwarzanej w wyniku reakcji syntezy jądrowej do mocy doprowadzonej do układu na skutek grzania plazmy. W ITER, przewiduje się, że $Q \geq 10$, co oznacza dostarczenie dziesięciokrotnie większej mocy niż moc zużywana przez systemy grzewcze.

q95 – tzw. współczynnik bezpieczeństwa przy 95 % małego promienia plazmy. Q określa ilość obrotów linii pola w kierunku toroidalnym do obrotów w kierunku poloidalnym.

Pellets – małe granulki zamrożonego paliwa deuterowego i trytowego o średnicy 3-6 mm. Wpuszczane z dużą częstotliwością (do 20 granulek na sekundę) do plazmy w celu utrzymania wystarczającej gęstości paliwa w rdzeniu plazmy. Za pomocą pelletów można regulować brzegowe niestabilności ELM.

PFC (*ang. plasma facing components*) komponenty pierwszej ściany tokamaka bezpośrednio wystawione na działanie plazmy.

Pierwsza ściana (*first wall*) - wewnętrzna powierzchnia urządzenia termojądrowego znajdująca się najbliżej plazmy.

Promień duży R (*major radius*) – w tokamaku - odległość od środka symetrii układu tokamaka do geometrycznego środka przekroju sznura plazmowego w toroidalnej komorze tokamaka.

Promień mały a (*minor radius*) – w tokamaku – połowa poziomego przekroju toroidalnej komory tokamaka.

Punkt X (*X-point*) – punkt, w którym krzyżują się (przecinają) zewnętrzne linie pola magnetycznego (separatrysy). Wartość poloidalnego pola magnetycznego w punkcie X wynosi zero. Miejsce to znajduje się w obszarze divertora.

Retencja paliwa – zatrzymywanie paliwa w materiale ściany reaktora.

RF (*Radio-Frequency*) fale elektromagnetyczne o częstościach radiowych. Fale RF są używane w układach w urządzeniach termojądrowych w celu dodatkowego grzania plazmy.

Sawteeth – niestabilność powszechnie obserwowana w rdzeniu plazmy tokamakowej. Niestabilności te występują okresowo i powodują nagły spadek temperatury i gęstości w centrum plazmy. Nazwa wynika z charakterystycznego kształtu piłokształtnego wielu sygnałów diagnostycznych.

Scenariusz podstawowy (ang. *baseline scenario*) – plazma o wysokim prądzie I_p i co za tym idzie małym q_{95} . Proxy dla scenariusza referencyjnego w ITER z $Q = 10$, $I_p = 15$ MA przy $q_{95} \sim 3$.

Scenariusz hybrydowy (ang. *hybrid scenario*) – plazma o zredukowanym prądzie I_p i co za tym większym q_{95} . Proxy dla długich wyładowań w ITER $t > 1000$ s, z $Q = 5$, $I_p = 12$ MA przy $q_{95} \sim 4.3$.

Separatrysa – granica oddzielająca otwarte i zamknięte linie pola magnetycznego w tokamaku.

SOL (*Scrape-Off Layer*) – obszar plazmy pomiędzy jej brzegiem, zdefiniowanym przez separatrycę a komorą tokamaka.

Sputtering – proces, w którym atomy i jony są wybijane z powierzchni ciała stałego (np. z elementów wewnętrznych komory tokamaka) na skutek bombardowania cząsteczkami o dużej energii.

Stellarator – rodzaj zamkniętej pułapki magnetycznej o skomplikowanej konfiguracji pola magnetycznego wykorzystywanej do utrzymywania gorącej plazmy. W stellaratorach nie jest stosowany układ transformatorowy do generowania prądu w plazmie. Plazma jest grzana ze źródeł zewnętrznych falami elektromagnetycznymi i strumieniem atomów.

Tokamak – skrót pochodzący od rosyjskich nazwy *Toroidalnaja Kamiera s Magnitnymi Katuszkami*. Tokamak jest urządzeniem wykorzystywanym do inicjowania i badania kontrolowanej reakcji syntezy termojądrowej w gorącej plazmie deuterowej, lub deuterowo-trytowej. Główna komora ma kształt toroidalny. Prąd płynący w plazmie w tej komorze indukowany jest, jako prąd we wtórnym obwodzie transformatora, którego obwodem pierwotnym jest uzwojenie na rdzeniu żelaznym znajdującym się w centrum układu. Plazma jest utrzymywana polem magnetycznym stanowiącym sumę pola indukowanego przez przepływ prądu w plazmie, pola indukowanego przez cewki poloidalne i cewki korekcyjne. Oprócz grzania plazmy prądem stosuje się dodatkowe grzanie falami elektromagnetycznymi i wiązkami atomów neutralnych

Trójkątność plazmy δ (*plasma triangularity*) – parametr określający kształt plazmy w jej przekroju.

Wendelstein 7-X – zaawansowany stellarator, znajdujący się w Instytucie IPP w Greifswaldzie w Niemczech. Rozpoczął działanie w grudniu 2015 r. Jest największym stellaratorem na świecie o średnicy 16 m. Oczekuje się, że będzie w stanie utrzymać plazmę o temperaturze 100 milionów stopni Celsjusza do 30 minut.

Zanieczyszczenia – atomy niechcianych pierwiastków w plazmie, zazwyczaj pochodzących z otaczających ścian.

Zeff – efektywny ładunek jonów w plazmie, określane też skrótowo, jako efektywny ładunek plazmy. Jest miarą ilości zanieczyszczeń w plazmie utrzymywanej zewnętrznym polem magnetycznym. Dla czystej plazmy deuterowo-trytowej lub deuterowej $Z_{\text{eff}} = 1$

Autoreferat zawiera 60 ponumerowanych stron

Agata Chomiczewska