https://doi.org/10.34862/rbm.2025.2.7
otrzymano: 13.IX.2024, zaakceptowano: 15.XII.2025

Izabela Fornal
Uniwersytet Jagielloński
izabela.fornal@student.uj.edu.pl
https://orcid.org/0000-0002-6643-9804

# Przyszłość energetyki – od fuzji termojądrowej po pierwsze reaktory

**Abstrakt:** Artykuł poświęcony jest analizie potencjału energetyki termojądrowej jako przyszłego filaru systemu energetycznego oraz bezpieczeństwa energetycznego państw. Celem badania jest ocena aktualnego etapu rozwoju technologii fuzyjnych oraz ich możliwych konsekwencji geopolitycznych, gospodarczych i społecznych. Na podstawie analizy literatury przedmiotu, raportów instytucjonalnych (m.in. IAEA, IEA, OECD/NEA) oraz dokumentów projektowych dotyczących kluczowych programów badawczych (ITER, JT-60SA, STEP) przedstawiono główne zalety i ograniczenia fuzji termojądrowej w odniesieniu do transformacji energetycznej. Artykuł omawia również wyzwania związane z kosztami, długim horyzontem komercjalizacji, ryzykiem nierówności technologicznych, podwójnym (cywilno-wojskowym) charakterem części technologii oraz zagrożeniami dla infrastruktury krytycznej. Osobną uwagę poświęcono polskiemu wkładowi w badania fuzyjne w ramach EUROfusion. Wyniki analizy wskazują, że fuzja termojądrowa ma wysoki potencjał jako niskoemisyjne i stabilne źródło energii, jednak jej przekształcenie w realny filar miksu energetycznego będzie zależeć od tempa postępu technologicznego, ram regulacyjnych oraz zdolności utrzymania długofalowej współpracy międzynarodowej.

**Słowa kluczowe:** fuzja jądrowa, energetyka fuzyjna, bezpieczeństwo energetyczne, tokamak, ITER, JT-60SA, STEP, geopolityka energii, Polska, badania nad fuzją.

# The Future of Energy – From Thermonuclear Fusion to the First Reactors

**Abstract:** This article analyses the potential of thermonuclear fusion as a future cornerstone of the global energy system and a crucial factor for national energy security. The study aims to assess

the current stage of fusion technology development and its possible geopolitical, economic and social implications. Drawing on an analysis of relevant literature, institutional reports (IAEA, IEA, OECD/NEA) and project documentation for major international fusion programmes (ITER, JT-60SA, STEP), the article discusses the main advantages and limitations of fusion in the context of the low-carbon energy transition. Particular attention is given to the challenges posed by high investment costs, the lengthy commercialisation timeline, the risk of emerging technological inequalities, the dual-use nature of certain technologies and threats to critical infrastructure. The article also highlights Poland's contribution to fusion research within the EUROfusion framework. The findings indicate that thermonuclear fusion has significant potential as a low-emission and stable energy source; however, its evolution into a practical component of the energy mix will depend on technological advancements, appropriate regulatory frameworks and the ability of states to maintain long-term international cooperation.

**Keywords:** thermonuclear fusion, fusion energy, energy security, tokamak, ITER, JT-60SA, STEP, geopolitics of energy, Poland, fusion research

## Wstęp

Energetyka odgrywa kluczową rolę w kształtowaniu bezpieczeństwa państw, ich stabilności gospodarczej oraz pozycji w systemie międzynarodowym (International Energy Agency [IEA], 2023). W obliczu rosnącego zapotrzebowania na energię, postępującej transformacji klimatycznej oraz niestabilności rynków surowcowych coraz wyraźniej ujawniają się ograniczenia dotychczasowych modeli wytwarzania energii opartych na paliwach kopalnych (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2023). Wyzwania te skłaniają państwa do poszukiwania nowych technologii, które zapewniłyby jednocześnie niskoemisyjność, stabilność dostaw oraz długoterminowe bezpieczeństwo energetyczne.

Jednym z kierunków rozwoju, który w ostatnich latach zyskuje szczególne znaczenie strategiczne, jest energetyka termojądrowa. Fuzja termojądrowa postrzegana jest jako technologia potencjalnie przełomowa, zdolna w przyszłości zmienić strukturę globalnego systemu energetycznego (International Atomic Energy Agency [IAEA], 2023). W przeciwieństwie do klasycznej energetyki jądrowej opartej na rozszczepieniu jąder atomowych, energetyka fuzyjna charakteryzuje się innym profilem ryzyk: nie generuje długotrwałych odpadów promieniotwórczych, nie wiąże się z ryzykiem niekontrolowanej reakcji łańcuchowej oraz bazuje na paliwie szeroko dostępnym na Ziemi (IAEA, 2023; World Nuclear Association [WNA], 2024).

Porównanie energetyki termojądrowej z dotychczas stosowanymi technologiami – zarówno paliwowymi, jak i jądrowymi – ukazuje jej możliwy wpływ na przyszłą architekturę bezpieczeństwa energetycznego (IEA, 2023). W przypadku pełnoskalowego wdrożenia fuzji państwa mogłyby znacząco ograniczyć zależność od importu surowców energetycznych, zmniejszyć podatność na zakłócenia dostaw oraz osłabić geopolityczne znaczenie rynków paliw kopalnych (IEA, 2023). W przeciwieństwie do energetyki jądrowej opartej na uranie, która nadal wymaga dostępu do ograniczonych zasobów oraz rozbudowanych systemów składowania odpadów, energetyka termojądrowa mogłaby funkcjonować w oparciu o paliwo dostępne globalnie, co zasadniczo zmienia logikę bezpieczeństwa energetycznego (WNA, 2024).

Jednocześnie należy podkreślić, że energetyka termojądrowa pozostaje technologią rozwijaną głównie w ramach projektów eksperymentalnych i demonstracyjnych, realizowanych w szerokiej współpracy międzynarodowej, takich jak ITER, JT-60SA oraz STEP (IAEA, 2023). Oznacza to, że obecnie fuzja pełni przede wszystkim rolę strategicznego kierunku rozwoju, a nie realnego filaru systemów energetycznych. Jej przyszłe wdrożenie uzależnione jest od przezwyciężenia barier technologicznych, finansowych i organizacyjnych, co rodzi również nowe wyzwania dla bezpieczeństwa infrastruktury krytycznej oraz kontroli nad zaawansowanymi technologiami (*dual-use*) (OECD/NEA, 2025).

Celem niniejszego artykułu jest analiza potencjału rozwoju energetyki termojądrowej w kontekście zmian w światowym sektorze energetycznym oraz jej znaczenia dla bezpieczeństwa energetycznego państw. W pracy wykorzystano analizę literatury przedmiotu, raportów instytucjonalnych oraz dokumentów projektowych dotyczących kluczowych programów fuzyjnych. Pytania badawcze dotyczą w szczególności różnic pomiędzy energetyką termojądrową a klasyczną energetyką jądrową i konwencjonalną, barier ograniczających wdrożenie fuzji oraz możliwych konsekwencji geopolitycznych przejścia do nowego modelu wytwarzania energii (IEA, 2023; OECD/NEA, 2025).

Przyjęta hipoteza badawcza zakłada, że energetyka termojądrowa może w długiej perspektywie stać się jednym z kluczowych czynników wzmacniających bezpieczeństwo energetyczne, jednak jej realny wpływ na system energetyczny świata będzie zależny od tempa postępu technologicznego oraz zdolności państw do utrzymania współpracy międzynarodowej w tym obszarze (IAEA, 2023; WNA, 2024).

## Potencjał energii termojądrowej

Potencjał energetyki termojądrowej wynika nie tyle z samego mechanizmu reakcji fizycznej, ile z jej długofalowych konsekwencji surowcowych, systemowych, gospodarczych oraz geopolitycznych. W przeciwieństwie do energetyki konwencjonalnej opartej na paliwach kopalnych oraz klasycznej energetyki jądrowej, wykorzystującej rozszczepienie jąder atomowych, fuzja termojądrowa opiera się na łączeniu lekkich izotopów wodoru, co w perspektywie długoterminowej stwarza możliwość niemal niewyczerpalnego źródła energii przy jednoczesnym ograniczeniu ryzyk środowiskowych i politycznych (IAEA, 2023; WNA, 2024).

Kluczowym elementem potencjału fuzyjnego jest dostępność paliwa. Deuter, podstawowy izotop wodoru wykorzystywany w reakcjach termojądrowych, występuje naturalnie w wodach oceanicznych w ilościach wystarczających do zaspokojenia globalnych potrzeb energetycznych przez tysiące lat, natomiast tryt może być wytwarzany bezpośrednio w reaktorze z wykorzystaniem litu w tzw. płaszczu trytowym (WNA, 2024). Oznacza to, że cykl paliwowy fuzji może być w dużej mierze samowystarczalny. Z punktu widzenia bezpieczeństwa energetycznego stanowi to fundamentalną różnicę w porównaniu z węglem, ropą naftową, gazem ziemnym czy uranem, których zasoby są geograficznie skoncentrowane i często powiązane z niestabilnością polityczną. Perspektywa szerokiego wdrożenia fuzji otwiera zatem możliwość trwałego ograniczenia zależności importowych oraz zmniejszenia podatności państw na szantaż surowcowy (IEA, 2023).

Istotny potencjał energetyki termojądrowej ujawnia się również na poziomie systemowym. Reaktory fuzyjne, w przeciwieństwie do większości odnawialnych źródeł energii, mogą pracować w sposób ciągły i przewidywalny, zapewniając stabilne dostawy energii elektrycznej w ramach tzw. obciążenia podstawowego systemów elektroenergetycznych (IAEA, 2023). Oznacza to, że energetyka fuzyjna mogłaby w przyszłości pełnić funkcję stabilizującą wobec rosnącego udziału źródeł niestabilnych, takich jak energetyka wiatrowa i słoneczna, zmniejszając jednocześnie potrzebę rozbudowy kosztownych systemów magazynowania energii. Z perspektywy bezpieczeństwa infrastruktury krytycznej zwiększałoby to odporność systemów energetycznych na zakłócenia wynikające z kryzysów surowcowych, awarii sieciowych czy konfliktów międzynarodowych (IEA, 2023).

Wymiar geopolityczny potencjału energii termojądrowej wiąże się z możliwością osłabienia znaczenia rynków paliw kopalnych jako narzędzia wpływu po-

litycznego. W długiej perspektywie upowszechnienie fuzji może prowadzić do stopniowego ograniczenia roli surowców energetycznych w polityce międzynarodowej oraz do zmiany układu sił pomiędzy eksporterami a importerami energii. Jednocześnie wzrośnie znaczenie państw dysponujących zapleczem technologicznym umożliwiającym budowę i eksploatację reaktorów fuzyjnych, co może prowadzić do powstania nowej linii podziału pomiędzy państwami wysokiej innowacyjności, a tymi, które pozostaną jedynie odbiorcami technologii (OECD/NEA, 2025). W tym ujęciu energetyka termojądrowa staje się nie tylko źródłem energii, lecz również instrumentem długookresowej przewagi technologicznej i gospodarczej.

Należy jednak podkreślić, że potencjał energetyki termojądrowej ma charakter wyraźnie warunkowy. Pomimo intensywnych badań oraz zaangażowania licznych państw w projekty eksperymentalne, takie jak ITER, JT-60SA czy STEP, technologia ta wciąż znajduje się na etapie demonstracyjnym (IAEA, 2023). Skala inwestycji niezbędnych do budowy pierwszych elektrowni fuzyjnych liczona jest w dziesiątkach miliardów euro, a horyzont ich wdrożenia komercyjnego szacowany jest dopiero na połowę XXI wieku (OECD/NEA, 2025). Realizacja pełnego potencjału fuzji uzależniona jest również od przezwyciężenia barier materiałowych, zapewnienia trwałości konstrukcji narażonych na intensywne promieniowanie neutronowe oraz stworzenia bezpiecznych systemów produkcji i magazynowania trytu.

W konsekwencji energetyka termojądrowa nie stanowi rozwiązania bieżących problemów energetycznych świata, lecz potencjalny filar przyszłego, niskoemisyjnego systemu energetycznego. W sprzyjających warunkach technologicznych i instytucjonalnych może ona wzmocnić bezpieczeństwo energetyczne państw, ograniczyć presję geopolityczną związaną z dostępem do surowców oraz zwiększyć stabilność globalnych dostaw energii (IAEA, 2023; WNA, 2024). Jednocześnie opóźnienia w rozwoju tej technologii lub niepowodzenie projektów demonstracyjnych mogą pogłębić nierówności technologiczne i energetyczne w systemie międzynarodowym, generując nowe napięcia i asymetrie rozwojowe.

## Wyzwania związane z wytwarzaniem energii

Pomimo bardzo wysokiego potencjału energetyki termojądrowej jej praktyczne wdrożenie napotyka na szereg barier, które mają nie tylko wymiar technologiczny,

lecz również wyraźny wymiar społeczny. Do najważniejszych problemów społecznych związanych z rozwojem fuzji jądrowej należy zaliczyć: (1) bardzo wysokie koszty badań i inwestycji infrastrukturalnych, (2) długi horyzont czasowy komercjalizacji technologii, (3) niepewność efektów ekonomicznych dla odbiorców końcowych, (4) ryzyko powstawania nowych nierówności technologicznych między państwami, (5) obawy społeczne związane z bezpieczeństwem instalacji jądrowych, a także (6) zagrożenia cybernetyczne oraz potencjalny wojskowy charakter części technologii (*dual-use*) (OECD/NEA, 2025; IAEA, 2023).

Konsekwencją wysokich kosztów inwestycyjnych jest ograniczony dostęp do technologii fuzyjnych – wyłącznie dla najbardziej rozwiniętych gospodarek. Budowa infrastruktury badawczej, takiej jak międzynarodowy reaktor eksperymentalny ITER, którego koszt przekracza wiele dziesiątek miliardów euro, powoduje silną koncentrację wiedzy, kapitału i kompetencji technologicznych w wąskiej grupie państw uczestniczących w projekcie (IAEA, 2023; WNA, 2024). W konsekwencji może to prowadzić do pogłębienia globalnych nierówności technologicznych oraz uzależnienia energetycznego krajów słabiej rozwiniętych od państw posiadających dostęp do technologii fuzyjnych.

Długi horyzont czasowy komercjalizacji fuzji jądrowej stanowi kolejne wyzwanie społeczne i polityczne. Społeczeństwa ponoszą bowiem koszty finansowania badań fundamentalnych, nie otrzymując w krótkiej perspektywie bezpośrednich korzyści w postaci tańszej energii. Może to skutkować narastającą presją polityczną na ograniczanie wydatków publicznych na projekty badawcze, zwłaszcza w okresach kryzysów gospodarczych i napięć budżetowych (OECD/NEA, 2025). W dłuższym okresie grozi to spowolnieniem rozwoju technologii oraz utratą społecznej akceptacji dla wielkoskalowych inwestycji w energetykę jądrową.

Istotnym problemem społecznym pozostają także obawy dotyczące bezpieczeństwa instalacji termojądrowych. Mimo że reaktory fuzyjne nie stwarzają ryzyka niekontrolowanej reakcji łańcuchowej ani klasycznych katastrof jądrowych, społeczne postrzeganie technologii jądrowych pozostaje silnie naznaczone doświadczeniami awarii w elektrowniach rozszczepieniowych. W przypadku fuzji, głównym źródłem promieniotwórczości są materiały konstrukcyjne aktywowane przez neutrony, których czas zaniku promieniotwórczego wynosi od kilkudziesięciu do kilkuset lat, co stanowi wartość nieporównywalnie mniejszą niż w przypadku odpadów wysokoaktywnych z energetyki uranowej (IAEA, 2023; WNA, 2024). Mimo to nawet lokalne awarie, prowadzące do skażeń elementów insta-

lacji, mogłyby znacząco osłabić zaufanie społeczne do tej technologii i wywołać sprzeciw wobec jej dalszego rozwoju.

Źródłem dodatkowych obaw są również zagrożenia cybernetyczne. Nowoczesne reaktory termojądrowe będą oparte na zaawansowanych systemach sterowania plazmą i bezpieczeństwem w czasie rzeczywistym, co czyni je potencjalnym celem cyberataków. Skuteczny atak mógłby nie tylko doprowadzić do zatrzymania pracy instalacji, lecz również wygenerować poważne straty finansowe oraz zagrożenie dla infrastruktury krytycznej (OECD/NEA, 2025). Z punktu widzenia społeczeństw oznacza to konieczność rozbudowy kosztownych systemów ochrony teleinformatycznej oraz odpowiednich ram prawnych dla bezpieczeństwa cyfrowego.

Kolejnym istotnym problemem o wymiarze społecznym i politycznym jest podwójny (cywilno-wojskowy) charakter części technologii fuzyjnych. Technologie związane z obsługą trytu, diagnostyką neutronową czy wysokoenergetycznymi systemami magnetycznymi mogą znaleźć zastosowanie również w sektorze militarnym. Rodzi to potrzebę ścisłych mechanizmów kontroli, przejrzystości oraz międzynarodowego nadzoru pod auspicjami takich instytucji jak International Atomic Energy Agency (IAEA, 2023). W przeciwnym razie może dojść do wzrostu napięć międzynarodowych oraz postrzegania energetyki termojądrowej nie tylko jako projektu cywilizacyjnego, lecz także jako elementu rywalizacji strategicznej.

Wreszcie, problemem o charakterze społecznym pozostaje kwestia dostępu do paliwa i infrastruktury produkcji trytu. Najwydajniejsza reakcja fuzyjna zachodzi pomiędzy deuterem i trytem, przy czym tryt musi być wytwarzany w reaktorze z wykorzystaniem litu. Proces ten jest technologicznie złożony i kosztowny, a niewłaściwe nim zarządzanie może rodzić zagrożenia radiologiczne oraz sprzeciw społeczny wobec lokalizacji instalacji produkcyjnych (Bolt i in., 2002; Shimada i in., 2015).

Wszystkie wymienione problemy przekładają się na szereg konsekwencji społecznych i politycznych. Po pierwsze, rozwój energetyki termojądrowej może pogłębiać globalne nierówności technologiczne i energetyczne. Po drugie, wysoki poziom kosztów i niepewność efektów ekonomicznych może osłabiać poparcie społeczne dla długofalowej transformacji energetycznej. Po trzecie, obawy związane z bezpieczeństwem, cyberzagrożeniami i militarnym charakterem części technologii mogą prowadzić do społecznej polaryzacji wokół inwestycji jądrowych oraz wzrostu napięć politycznych na poziomie krajowym i międzynarodowym.

Wyzwania związane z wytwarzaniem energii termojądrowej wykraczają poza sferę zagadnień czysto inżynieryjnych i fizycznych, obejmując również złożone uwarunkowania społeczne, ekonomiczne oraz bezpieczeństwa. Od skuteczności ich przezwyciężenia będzie w dużej mierze zależało, czy fuzja jądrowa stanie się technologią powszechnie akceptowaną społecznie i trwałym filarem przyszłych systemów energetycznych, czy też pozostanie kosztownym projektem badawczym realizowanym jedynie przez wąskie grono najbardziej rozwiniętych państw (IAEA, 2023; OECD/NEA, 2025).

Złożony charakter rozwoju energetyki termojądrowej sprawia, że jej potencjał nie może być analizowany wyłącznie w kategoriach technologicznych. Proces ten oddziałuje równocześnie na środowisko naturalne, gospodarkę, bezpieczeństwo międzynarodowe oraz sferę społeczną i etyczną. Każdy z tych obszarów generuje zarówno istotne korzyści, jak i nowe ryzyka, które pozostają ze sobą w dynamicznej relacji oraz podlegają stałej rekonfiguracji wraz z postępem badań i zmianami w otoczeniu geopolitycznym. Dla uporządkowania tych zależności oraz syntetycznego ujęcia głównych szans i ograniczeń wdrożenia fuzji termojądrowej, w tabeli 1 zestawiono kluczowe zalety i ryzyka tej technologii w podziale na kategorie środowiskowe, technologiczne, ekonomiczne, geopolityczne, społeczne i bezpieczeństwa.

Tabela 1: Zalety i ograniczenia energetyki termojądrowej w kontekście bezpieczeństwa energetycznego.

| KATEGORIE | ZALETY (POTENCJAŁ) | RYZYKA I OGRANICZENIA |
|---|---|---|
| ŚRODOWISKOWE | Brak emisji CO2 w procesie wytwarzania energii. Minimalna ilość odpadów radioaktywnych fuzji w porównaniu z klasyczną energetyką jądrową. Ograniczenie eksploatacji paliw kopalnych i ochrona klimatu. | Ograniczenia w utylizacji odpadów. Możliwe skażenie środowiska, kiedy odpadem będzie tryt lub inne produkty rozszczepialne, co może być przyczyną w wyniku awarii. |
| TECHNOLOGICZNE | Fuzja termojądrowa zapewnia niemal nieograniczone źródło energii (paliwo: deuter I tryt). Postęp w technologii nadprzewodników I plazmy (ITER, JT-60SA, STEP). | Trudności w utrzymaniu stabilnej I wysokiej plazmy I wysokich temperatur (100 mln K). Brak materiałów w pełni w pełni odpornych na długotrwałe napromieniowanie neutronami. Wysokie koszty infrastruktury eksperymentalnej. |

| | | |
|---|---|---|
| EKONOMICZNE | W długim okresie potencjalne obniżenie kosztów energii I należności surowca państwa.<br>Możliwości rozwój nowych sektorów gospodarskich wysokich technologii. | Wysokie koszty budowy I utrzymania reaktorów (ITER szacowany jest na ponad 20 mld euro). Długi czas zwrotu inwestycji (ponad 20-30 lat). |
| GEOPOLITYCZNE | Zwiększenie bezpieczeństwa energetycznego i zmniejszenie zależności od importu paliw kopalnych.<br>Wzmocnienie współpracy międzynarodowej (projekt ITER, STEP, JT-60SA). | Ryzyko nowej nierówności technologicznej miedzy państwami posiadającymi dostęp do technologii fuzyjnej a resztą świata.<br>Potencjalne wykorzystanie wiedzy technologicznej w aspektach militarnych (nowe bomby oparte na fuzji termojądrowej). |
| SPOŁECZNE I ETYCZNE | Akceptacja społeczna do czystej energii: możliwość redukcji globalnych konfliktów surowcowych.<br>Nowe miejsca pracy w sektorach wysokiej technologii. | Niska świadomość społeczna i obawy wobec bezpieczeństwa jądrowo.<br>Możliwość protestów lokalnych przeciwko inwestycjom w reaktory. |
| BEZPIECZEŃSTWO | Ograniczony czas aktywności promieniotwórczej odpadów.<br>Wysoki poziom wbudowanych pasywnych systemów bezpieczeństwa<br>Ryzyko sabotażu infrastruktury krytycznej.<br>Konieczność ścisłej kontroli obrotu trytem. | Brak ryzyka niekontrolowanej reakcji łańcuchowych.<br>Zagrożenia cybernetyczne dla systemów sterowania reaktorami. |

Źródło: opracowanie własne na podstawie raportów międzynarodowych:
IAEA (2023), OECD/NEA (2025), WNA (2025), IPP (b.d. a,b).

Zestawienie zaprezentowane w tabeli 1 pokazuje, że energetyka termojądrowa posiada potencjał do zasadniczej zmiany globalnego systemu energetycznego, jednak jej rozwój obarczony jest jednocześnie istotnymi ryzykami technologicznymi, ekonomicznymi, społecznymi i bezpieczeństwa. Skala tych wyzwań sprawia, że proces wdrażania fuzji musi być prowadzony w sposób długofalowy, kontrolowany oraz oparty na szerokiej współpracy międzynarodowej i społecznej akceptacji.

## Reaktory termojądrowe

Fizyka i inżynieria termojądrowa należą obecnie do najszybciej rozwijających się obszarów badań nad przyszłymi systemami energetycznymi. Wynika to z rosnącego zapotrzebowania na stabilne, niskoemisyjne źródła energii oraz z ograniczeń technologicznych i politycznych związanych z klasyczną energetyką jądrową i paliwami kopalnymi (IAEA, 2023; WNA, 2025). Rozwój reaktorów fuzyjnych wiąże się jednak z ogromnymi kosztami infrastrukturalnymi, wysokim stopniem skomplikowania technologicznego oraz koniecznością prowadzenia długoterminowych, wieloetapowych badań. Z tego względu państwa nie rywalizują w tym obszarze w klasycznym sensie, lecz tworzą szerokie konsorcja badawcze.

Współpraca międzynarodowa w energetyce termojądrowej wynika z trzech podstawowych przesłanek. Po pierwsze, pojedyncze państwo nie jest w stanie samodzielnie udźwignąć wielomiliardowych kosztów budowy i eksploatacji instalacji badawczych. Po drugie, skala złożoności technologicznej wymaga integracji kompetencji z zakresu fizyki plazmy, materiałoznawstwa, kriogeniki, elektroniki mocy oraz systemów bezpieczeństwa. Po trzecie, projekty fuzyjne mają charakter infrastruktury naukowej o znaczeniu globalnym, a ich rezultaty są kluczowe dla bezpieczeństwa energetycznego całych regionów świata (Saniawa, 2023; Czerniawski, 2019). W tym sensie kooperacja zastępuje klasyczną rywalizację, ponieważ tylko wspólny wysiłek umożliwia osiągnięcie efektu technologicznego w akceptowalnym horyzoncie czasowym.

Jednym z najważniejszych współczesnych eksperymentów w obszarze reaktorów termojądrowych jest JT-60SA, czyli nadprzewodzący tokamak powstały w ramach współpracy Japonii z Unią Europejską. Skrót „JT" oznacza Japan Torus, natomiast „SA" – Super Advanced, co wskazuje na zaawansowaną klasę urządzenia. Projekt realizowany jest w ośrodku badawczym Japońskiej Agencji Energii Atomowej (Japan Atomic Energy Agency, JAEA) w Naraha, a jego budowa rozpoczęła się w 2013 r.; pierwszą plazmę uzyskano w 2023 r. (JAEA, 2023; European Commission, 2021). JT-60SA nie jest elektrownią produkującą energię na potrzeby sieci, lecz instalacją badawczą służącą do testowania stabilnych, długotrwałych wyładowań plazmy oraz technologii, które znajdą zastosowanie w przyszłych reaktorach demonstracyjnych.

Poprzednikiem obecnego urządzenia był tokamak JT-60, działający w latach 1985–2008, który dostarczył kluczowych danych dotyczących zachowania pla-

zmy w warunkach wysokiej temperatury i gęstości. Doświadczenia te pozwoliły na zaprojektowanie nowej generacji zabezpieczeń przed zakłóceniami plazmy (tzw. *disruptions*), które w przyszłości mogłyby powodować poważne uszkodzenia ścian reaktora (Saniawa, 2023). W wersji JT-60SA zastosowano nadprzewodzące cewki magnetyczne chłodzone kriogenicznie, co umożliwia znacząco dłuższe czasy podtrzymania plazmy w porównaniu z wcześniejszymi tokamakami.

Głównym celem działania JT-60SA jest osiągnięcie długotrwałych, stabilnych wyładowań plazmy deuterowej przy parametrach zbliżonych do warunków przyszłej elektrowni termojądrowej. Pełna funkcjonalność urządzenia zakłada możliwość utrzymywania plazmy przez około 100 sekund przy temperaturach rzędu 100 mln K oraz prądzie plazmowym sięgającym 5,5 MA (JAEA, 2023). W praktyce oznacza to możliwość badania procesów charakterystycznych dla pracy reaktora w trybie stacjonarnym, takich jak dyfuzja prądu, transport cząstek oraz stabilność magnetohydrodynamiczna. Dodatkową zaletą jest zdolność pracy w trybie całkowicie bezindukcyjnym, co ma kluczowe znaczenie dla przyszłych elektrowni opartych na fuzji.

Projekt JT-60SA został zaprojektowany jako bezpośrednie zaplecze badawcze dla europejskiego projektu ITER. Jego zadaniem jest testowanie scenariuszy pracy plazmy, które będą następnie implementowane w reaktorze ITER, oraz opracowanie metod optymalizacji przyszłych elektrowni demonstracyjnych typu DEMO, stanowiących bezpośredni pomost między badaniami a produkcją energii na skalę przemysłową (American Nuclear Society [ANS], 2023; IAEA, 2023). W tym sensie JT-60SA pełni funkcję „poligonu doświadczalnego" dla całego globalnego programu energetyki fuzyjnej.

Istotnym elementem programu badawczego są również testy materiałowe. Początkowo zakłada się wykorzystanie elementów węglowych skierowanych w stronę plazmy, które następnie będą zastępowane materiałami metalowymi – głównie wolframem. Celem jest ocena odporności tych materiałów na intensywne strumienie neutronów oraz erozję powierzchniową, co ma fundamentalne znaczenie dla bezpieczeństwa przyszłych elektrowni termojądrowych (Czerniawski, 2019). Degradacja materiałów konstrukcyjnych może bowiem prowadzić do uwalniania zanieczyszczeń do plazmy, obniżenia sprawności reaktora oraz wzrostu ryzyka awarii.

Z perspektywy bezpieczeństwa międzynarodowego rozwój reaktorów termojądrowych ma charakter ambiwalentny. Z jednej strony technologie te mogą w długiej perspektywie wzmocnić bezpieczeństwo energetyczne państw poprzez

ograniczenie zależności od importu paliw kopalnych i redukcję presji geopolitycznej związanej z surowcami. Z drugiej strony, koncentracja zaawansowanych technologii w rękach wąskiej grupy wysoko rozwiniętych państw może pogłębiać globalne nierówności technologiczne. Dodatkowo część rozwiązań z zakresu fizyki plazmy, nadprzewodnictwa czy technologii neutronowych posiada potencjał podwójnego zastosowania (*dual-use*), co rodzi obawy dotyczące ich możliwego wykorzystania w sferze militarnej (IAEA, 2023).

Reaktory takie jak JT-60SA pokazują, że energetyka termojądrowa rozwija się dziś przede wszystkim w formule międzynarodowej współpracy, a nie technologicznej rywalizacji. Wynika to zarówno z ograniczeń finansowych, jak i z konieczności wspólnego minimalizowania ryzyk technicznych oraz bezpieczeństwa. Ostateczny sukces tej technologii będzie zależał nie tylko od postępu fizyki plazmy, lecz także od zdolności państw do utrzymania długofalowej kooperacji w warunkach narastających napięć geopolitycznych.

Najlepszym wyrazem tego modelu współdziałania jest projekt ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), który stanowi największe na świecie przedsięwzięcie badawcze w dziedzinie fuzji jądrowej. W projekcie uczestniczą Unia Europejska, Japonia, Stany Zjednoczone, Chiny, Korea Południowa oraz Indie, a do 2022 r. również Federacja Rosyjska. Tak szeroki zakres współpracy wynika z faktu, że żadne pojedyncze państwo nie dysponuje obecnie pełnym zapleczem finansowym, technologicznym i przemysłowym, umożliwiającym samodzielną realizację przedsięwzięcia tej skali. W odróżnieniu od sektora energetyki jądrowej opartej na rozszczepieniu, gdzie dominowała rywalizacja strategiczna, w przypadku fuzji jądrowej kluczowe znaczenie ma współzależność naukowa i technologiczna, obejmująca fizykę plazmy, inżynierię materiałową, systemy nadprzewodzące, technologie trytowe oraz zaawansowane układy sterowania (IAEA, 2023; WNA, 2024).

Podstawowym celem ITER jest uzyskanie po raz pierwszy w warunkach laboratoryjnych tzw. płonącej plazmy, czyli stanu, w którym energia uwalniana w reakcjach fuzji samopodtrzymuje proces syntezy. Zakłada się osiągnięcie mocy fuzyjnej rzędu 500 MW przy mocy grzewczej ok. 50 MW, co odpowiada współczynnikowi wzmocnienia energetycznego Q=10. ITER nie będzie jednak elektrownią produkującą energię elektryczną, lecz instalacją demonstracyjno-badawczą, która ma potwierdzić możliwość bezpiecznej i stabilnej pracy reaktora fuzyjnego w skali zbliżonej do przemysłowej (ITER Organization, 2025).

Istotną rolę przygotowawczą dla ITER pełnią europejskie ośrodki badawcze, w szczególności Max Planck Institute for Plasma Physics, prowadzący eksperymenty na tokamaku ASDEX Upgrade oraz stellaratorze Wendelstein 7-X. Badania te pozwalają na testowanie scenariuszy stabilizacji plazmy, kontroli zakłóceń, oddziaływań plazmy ze ściankami reaktora oraz systemów zasilania neutralnymi cząstkami. Szczególne znaczenie mają również prace nad oprogramowaniem sterowania w czasie rzeczywistym i symulacjami numerycznymi zakłóceń plazmowych, które bezpośrednio wspierają przygotowanie kampanii eksperymentalnych ITER (IPP, b.d. a,b).

Znaczenie projektu ITER wykracza poza samą sferę badań naukowych. Uzyskane wyniki stanowić będą bezpośrednią podstawę do budowy reaktorów demonstracyjnych typu DEMO, które mają już pełnić funkcję źródeł energii elektrycznej w systemach krajowych. W ujęciu geopolitycznym rozwój fuzji termojądrowej może w perspektywie długoterminowej ograniczyć zależność państw od paliw kopalnych oraz surowców pochodzących z regionów niestabilnych politycznie. Jednocześnie technologie rozwijane na potrzeby ITER — w szczególności w zakresie nadprzewodnictwa, materiałów odpornych na intensywne napromieniowanie neutronowe, zdalnej obsługi oraz diagnostyki jądrowej — posiadają potencjał podwójnego zastosowania, co wzmacnia znaczenie tej technologii również z punktu widzenia bezpieczeństwa międzynarodowego (IAEA, 2023; ITER Organization, 2025).

## Przyszłość energetyki termojądrowej

W ostatnich latach energetyka termojądrowa ponownie znalazła się w centrum zainteresowania środowisk naukowych, rządów oraz inwestorów prywatnych, co świadczy o wyraźnym odrodzeniu globalnych ambicji związanych z jej komercjalizacją. Dotychczas rozwój fuzji był domeną wielkich, kosztownych projektów międzynarodowych, takich jak ITER, jednak obecnie coraz większą rolę odgrywają także podmioty prywatne, które proponują alternatywne, mniejsze i potencjalnie tańsze koncepcje reaktorów. Zmiana ta prowadzi do istotnego przyspieszenia badań, większej konkurencji technologicznej oraz dywersyfikacji ścieżek rozwoju energetyki fuzyjnej (The Economist, 2023).

Nowa fala zainteresowania fuzją wynika przede wszystkim z postępu w obszarze fizyki plazmy, rozwoju nadprzewodników wysokotemperaturowych oraz sys-

temów sterowania w czasie rzeczywistym. Dzięki temu pojawiają się coraz bardziej realistyczne prognozy zakładające, że pierwsze elektrownie fuzyjne zdolne do zasilania sieci energetycznej mogą powstać w latach 30. lub 40. XXI wieku. Choć są to wciąż scenariusze optymistyczne, to w porównaniu z wcześniejszymi dekadami, gdy komercjalizacja fuzji była stale odsuwana w nieokreśloną przyszłość, obecnie perspektywy te stały się znacznie bardziej konkretne (The Economist, 2023). Jak wykazano w Globalnym Raporcie Rynku Energii Termojądrowej 2026–2046, największym wyzwaniem jest zapewnienie nieprzerwanego łańcucha dostaw, w tym modernizacje technologii wzbogacania pierwiastków (GlobeNewswire, 2025).

Istotną zmianą w rozwoju energetyki termojądrowej jest także przejście od projektów o charakterze czysto eksperymentalnym do rozwiązań projektowanych z myślą o przyszłej opłacalności rynkowej. Prywatne przedsiębiorstwa dążą do ograniczenia rozmiarów reaktorów, uproszczenia ich konstrukcji oraz skrócenia czasu budowy, co w dłuższej perspektywie może znacząco obniżyć koszty produkcji energii z fuzji. Jeżeli te założenia zostaną potwierdzone w praktyce, energetyka termojądrowa może stać się realną alternatywą nie tylko dla paliw kopalnych, lecz również dla klasycznej energetyki jądrowej (The Economist, 2023).

Z punktu widzenia bezpieczeństwa energetycznego państw szczególnie istotne jest to, że fuzja jądrowa oferuje możliwość produkcji energii w oparciu o paliwo powszechnie dostępne, niezależne od wahań geopolitycznych charakterystycznych dla rynków ropy naftowej, gazu ziemnego czy uranu. Upowszechnienie tej technologii mogłoby w dłuższym horyzoncie czasowym ograniczyć znaczenie surowców energetycznych jako narzędzia presji politycznej oraz zmniejszyć ryzyko konfliktów o dostęp do zasobów (The Economist, 2023). Jednocześnie państwa, które jako pierwsze opanują technologię komercyjnej fuzji, mogą uzyskać nową formę przewagi strategicznej.

Rozwój energetyki fuzyjnej wiąże się również z potencjalnymi konsekwencjami gospodarczymi. Powstający sektor fuzji może stać się jednym z filarów gospodarki wysokich technologii, generując nowe miejsca pracy w obszarach inżynierii materiałowej, elektroniki, automatyki, informatyki oraz przemysłu energetycznego. Inwestycje w fuzję wpisują się tym samym w szerszy nurt transformacji energetycznej, który łączy cele klimatyczne z rozwojem nowoczesnych gałęzi przemysłu (The Economist, 2023). Obecne inwestowanie w rynek energii fuzyjnej generuje koszty o wartości 9,8 mld USD według podej-

ścia technologicznego, regionu geograficznego, etapu firmy i typu inwestora z zastrzeżonymi danymi dotyczącymi trendów wyceny i wskaźników efektywności finansowania (GlobeNewswire, 2025). Na podstawie ujawnionych kosztów, m.in. projektu ITER, którego budżet wzrósł z pierwotnie zakładanych 5 mld USD do około 20 mld USD (ITER Organization, 2025), widać, że rozwój technologii fuzyjnych wiąże się nie tylko z ogromnymi wyzwaniami inżynieryjnymi, lecz także z dużą nieprzewidywalnością finansową. Jednocześnie należy podkreślić, że mimo rosnącego optymizmu fuzja termojądrowa pozostaje technologią obarczoną wysokim poziomem niepewności – nie istnieje jeszcze reaktor, który w sposób stabilny i długotrwały osiągałby dodatni bilans energetyczny w skali przemysłowej. Wiele innowacyjnych projektów znajduje się na wczesnym etapie rozwoju, co oznacza ryzyko, że część z nich okaże się technologicznie nieskalowalna lub ekonomicznie nieopłacalna. Ponadto proces przechodzenia od eksperymentu do komercyjnej elektrowni będzie wymagał rozwiązań regulacyjnych, systemów certyfikacji bezpieczeństwa oraz akceptacji społecznej, które mogą znacząco wpłynąć na tempo wdrażania tej technologii (The Economist, 2023).

Perspektywy rozwoju energetyki termojądrowej pozwalają więc postrzegać ją jako jeden z potencjalnych filarów przyszłego systemu energetycznego, jednak jej rola w globalnym miksie energii zależeć będzie od skutecznego przezwyciężenia barier technologicznych, ekonomicznych i instytucjonalnych. Fuzja nie stanowi rozwiązania problemów energetycznych w najbliższych latach, ale w średniej i długiej perspektywie może istotnie przekształcić sposób wytwarzania energii oraz wpłynąć na architekturę bezpieczeństwa energetycznego świata.

Choć trudno jest mówić o komercjalizacji fuzji na przestrzeni kilku lub kilkunastu przyszłych lat, dostępne analizy i plany badawczo-rozwojowe pozwalają wskazać możliwe etapy rozwoju tej technologii w nadchodzących dekadach. Opracowywane obecnie koncepcje reaktorów, rosnąca aktywność sektora prywatnego oraz stopniowe przechodzenie od eksperymentów do projektów pilotażowych tworzą podstawę do formułowania realistycznych scenariuszy – wdrażania technologii oraz komercjalizacji elektrowni termojądrowych. Zestawie tych etapów zostało przedstawione w tabeli 2.

Tabela nr 2: Ewolucja programu energetyki termojądrowej.

| OKRES | MOŻLIWY STAN |
|---|---|
| 2030–2040 | Rozwój zaawansowanych prototypów, m.in. mniejszych tokamaków wykorzystujących nadprzewodniki wysokotemperaturowe; intensyfikacja projektów start-upowych i partnerstw publiczno-prywatnych; testy materiałowe i systemów sterowania plazmą w czasie rzeczywistym. |
| 2040–2050 | Uruchomienie pierwszych pilotażowych elektrowni fuzyjnych o mocy 200–500 MW; integracja z sieciami energetycznymi; ocena realnych kosztów operacyjnych i trwałości komponentów w warunkach przemysłowych. |
| Po 2025 | Wzrost udziału fuzji w miksie energetycznym, komercjalizacja technologii w państwach rozwijających się i wysoko rozwiniętych; stopniowe zastępowanie elektrowni węglowych i gazowych. |
| Połowa – koniec XXI wieku | Możliwe przejście fuzji do roli jednego z kluczowych źródeł energii; radykalne ograniczenie emisji $CO_2$; stabilizacja globalnych rynków paliw i zmniejszenie ryzyka konfliktów o surowce. |

Źródło: opracowanie własne na podstawie: Moskowitz & Twombly, 2025; Ball, 2023; The Economist, 2023.

Opisane w tabeli 2 „kamienie milowe" wskazują kierunek rozwoju energetyki termojądrowej w kolejnych dekadach. Należy jednak uwzględnić inne czynniki w tym procesie, np. znaczenie militarne technologii oraz jej rolę w „wyścigu technologicznym" państw.

## Reaktory fuzyjne w sektorze wojskowym

Wykorzystanie militarne jest jednym z głównych czynników napędzających postęp technologiczny, dlatego także w przypadku fuzji termojądrowej pojawia się pytanie o jej potencjalne znaczenie dla sił zbrojnych. Choć obecnie główny nurt badań nad fuzją koncentruje się na energetyce cywilnej, wojsko od dekad interesuje się technologiami fuzyjnymi – nie w celu tworzenia nowej broni termojądrowej (ta istnieje od lat 50.), lecz ze względu na możliwość opracowania niewielkich, bezpiecznych źródeł energii, które mogłyby zwiększyć mobilność, autonomię i zdolności operacyjne sił zbrojnych (WikanaBioenergia, 2025).

Jak wskazują analizy, fuzja jądrowa mogłaby potencjalnie znaleźć zastosowanie w kilku obszarach wojskowych: jako kompaktowe źródło energii dla systemów uzbrojenia, jako element przyszłych systemów obrony przeciwrakietowej,

czy jako baza dla nowej generacji napędów dla okrętów oraz pojazdów wojskowych (WNN, 2025). Szacuje się, że stabilne i wydajne reaktory fuzyjne mogłyby zrewolucjonizować logistykę militarną, znacząco ograniczając zależność od tradycyjnych paliw i zwiększając zasięg działania jednostek.

Jednocześnie, mimo potencjalnych korzyści, należy podkreślić, że wizje militarnego zastosowania fuzji pozostają dziś czysto hipotetyczne. Obecnie nie istnieje żaden reaktor fuzyjny zdolny do pracy w warunkach wymaganych przez wojsko – ani pod względem rozmiaru, ani stabilności, ani bilansu energetycznego. Utrzymanie kontrolowanej reakcji fuzji wymaga ekstremalnych parametrów, których nie udało się jak dotąd osiągnąć w formie nadającej się do praktycznych zastosowań, co czyni tę technologię nadal obarczoną wysoką niepewnością technologiczną i operacyjną (Dickman, 1987).

Ewentualne włączenie technologii fuzyjnych do sfery wojskowej otwiera debatę dotyczącą ich wpływu na globalne bezpieczeństwo oraz normy etyczne. W literaturze zwraca się uwagę, że konsekwencje militarnego wykorzystania fuzji należy oceniać w trzech perspektywach: odporności technicznej systemów, bezpieczeństwa operacyjnego oraz etycznych skutków ich potencjalnej militaryzacji (Allenby, 2015).

Po pierwsze, ewentualne systemy oparte na fuzji musiałyby funkcjonować w warunkach polowych, co wymagałoby konstrukcji wyjątkowo stabilnej i mobilnej infrastruktury. W obecnym stanie rozwoju technologii, charakteryzującym się wrażliwością plazmy na zakłócenia, zbudowanie takiego systemu pozostaje mało realne.

Po drugie, kluczowe znaczenie miałaby przewidywalność samej reakcji. Wahania parametrów plazmy, które w zastosowaniach cywilnych są jedynie problemem technologicznym, w kontekście wojskowym mogłyby prowadzić do poważnych konsekwencji operacyjnych, ograniczając przydatność takich systemów.

Po trzecie, ewentualna militaryzacja fuzji rodzi szereg pytań etycznych i politycznych. Pojawienie się nowych narzędzi o potencjale strategicznym mogłoby zaburzyć równowagę sił i wzmacniać tendencje do eskalacji konfliktów. Otwiera to również dyskusję na temat przyszłej roli istniejącej energetyki jądrowej: czy zostałaby zepchnięta na dalszy plan, czy przeciwnie – objęta jeszcze surowszym reżimem kontroli w obawie przed niekontrolowanym rozprzestrzenianiem technologii.

Dlatego część badaczy podkreśla, że ewentualne zastosowania militarne fuzji wymagałyby nowej architektury regulacyjnej oraz mechanizmów współpracy

międzynarodowej, które ograniczałyby ryzyko destabilizacji systemu bezpieczeństwa (Pao, 2025).

Chociaż zastosowania cywilne pozostają głównym obszarem rozwoju technologii fuzyjnych, część państw prowadzi również analizy dotyczące potencjalnych konsekwencji militarnych wykorzystania tej technologii. Badania te mają charakter przede wszystkim koncepcyjny i dotyczą oceny perspektyw budowy kompaktowych, wysokoenergetycznych źródeł zasilania, systemów logistycznych o zwiększonej autonomii oraz rozwiązań mogących w przyszłości wpływać na strukturę sił zbrojnych. W literaturze przedmiotu podkreśla się jednak, że obecnie prace te nie mają charakteru operacyjnego, lecz koncentrują się na rozpoznaniu możliwości technologicznych i strategicznych (Allenby, 2015).

W Stanach Zjednoczonych zainteresowanie potencjalnymi militarnymi implikacjami fuzji wynika przede wszystkim z dążenia do uniezależnienia infrastruktury wojskowej od paliw kopalnych. Amerykańskie programy badawcze analizują możliwość opracowania kompaktowych, eksperymentalnych źródeł energii, które w przyszłości mogłyby zasilać systemy logistyczne lub mobilne bazy operacyjne, zapewniając większą autonomię i redukując ryzyko ataków na linie zaopatrzeniowe (Sayler, 2024).

Chiny, prowadząc intensywny rozwój technologii fuzyjnych w sektorze cywilnym, równolegle interesują się ich potencjalnym wpływem na stabilność strategiczną i długookresową pozycję geopolityczną państwa. W debacie eksperckiej wskazuje się, że dostęp do zaawansowanych technologii plazmowych i materiałowych może w perspektywie wzmacniać potencjał obronny oraz zwiększać autonomię energetyczną sił zbrojnych.

Rosja natomiast skupia się na badaniach podstawowych dotyczących fizyki plazmy i procesów wysokotemperaturowych, co wpisuje się w jej tradycyjny model wykorzystywania infrastruktury badawczej zarówno w kontekście cywilnym, jak i militarnym. Eksperci zwracają uwagę, że rosyjskie analizy dotyczące kompaktowych systemów energetycznych mogą być powiązane z dążeniem do utrzymania przewagi strategicznej w obszarze technologii wojskowych (Goddard & Larkin, 2025).

Francja – jako państwo gospodarza projektu ITER – koncentruje swoje analizy na potencjalnych implikacjach technologicznych wynikających z udziału w największym globalnym programie fuzyjnym. Chociaż główny cel ITER pozostaje jednoznacznie cywilny, francuskie środowiska obronne zwracają uwagę, że do-

świadczenia z zakresu nadprzewodnictwa, materiałów odpornych na intensywne napromieniowanie neutronowe czy diagnostyki plazmy mogą w przyszłości znaleźć zastosowanie w elementach infrastruktury wojskowej (Bosh & Hutter, 2020).

Zainteresowanie militarnym potencjałem technologii fuzyjnych nie wynika obecnie z prób bezpośredniego tworzenia broni opartej na syntezie jądrowej, lecz z dążenia do oceny możliwych skutków jej rozwoju dla systemów obronnych, logistyki czy zdolności operacyjnych. Państwa prowadzące takie analizy zakładają, że w długim okresie dostęp do stabilnych, wysokoefektywnych źródeł energii mógłby zmienić sposób funkcjonowania sił zbrojnych, zwiększając ich mobilność, odporność i autonomię. Jednocześnie badacze zwracają uwagę, że tego typu technologie mogą generować również nowe wyzwania dla ładu międzynarodowego, w tym ryzyko strategicznych asymetrii oraz konieczność wprowadzenia odpowiednich mechanizmów kontroli i nadzoru (Kroenig, 2020, s. 213–224).

Zainteresowanie fuzją w sektorze obronnym pokazuje, że technologia ta może w przyszłości wpłynąć na układ sił i sposób funkcjonowania nowoczesnych armii. Na obecnym etapie pozostaje jednak obszarem badań koncepcyjnych, obarczonych dużą niepewnością technologiczną. Dlatego to właśnie regulacje międzynarodowe i ocena długofalowych konsekwencji, a nie same możliwości inżynieryjne, przesądzą o tym, czy fuzja stanie się czynnikiem stabilizującym, czy nowym źródłem strategicznych napięć.

## Polskie badania nad fuzją

Polska, mimo braku własnego dużego reaktora fuzyjnego, od lat prowadzi aktywne i systematyczne prace w obszarze badań plazmowych oraz technologii niezbędnych do przyszłych elektrowni termojądrowych. Kluczową instytucją odpowiedzialną za rozwój krajowego potencjału w tym obszarze jest Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy (IFPiLM), który reprezentuje Polskę w europejskim konsorcjum EUROfusion. Dzięki temu polscy naukowcy uczestniczą w głównym nurcie europejskich prac nad ITER i projektami demonstracyjnymi typu DEMO (Gałkowski & Kubkowska, 2020a,b; Mikulski, 2020).

Istotnym elementem krajowego systemu badań jest także Centrum Nowych Technologii Energetycznych (CeNTE), skupiające kilkanaście jednostek naukowych oraz uczelni. CeNTE pełni rolę platformy integrującej zespoły pracujące

nad fizyką plazmy, symulacjami numerycznymi, inżynierią materiałową i technologiami wspierającymi rozwój fuzji. Konsolidacja ta umożliwia prowadzenie badań o zasięgu porównywalnym z większymi europejskimi ośrodkami oraz zapewnia spójność krajowej strategii naukowej (Gałkowski & Kubkowska, 2020a,b; Mikulski, 2020).

Polskie zespoły uczestniczą w badaniach eksperymentalnych realizowanych na zagranicznych urządzeniach, m.in. na tokamaku JET, stellaratorze Wendelstein 7-X, czy tokamaku ASDEX Upgrade. Wkład ten obejmuje przede wszystkim rozwój nowoczesnych systemów diagnostycznych plazmy — spektroskopii, pomiarów promieniowania, monitorowania transportu energii czy analizy zanieczyszczeń — które są kluczowe dla oceny stabilności plazmy oraz bezpieczeństwa pracy reaktorów. Jednocześnie w Polsce rozwijane są zaawansowane modele teoretyczne i symulacyjne umożliwiające przewidywanie parametrów plazmy w przyszłych urządzeniach typu ITER i DEMO. Badania te obejmują, m.in. modelowanie transportu cząstek oraz zjawisk brzegowych, które decydują o trwałości materiałów mających kontakt z plazmą (Gałkowski & Kubkowska, 2020a,b; Mikulski, 2020).

Znaczący wkład Polski dotyczy również technologii materiałowych i projektowania komponentów, które w przyszłości mają znaleźć zastosowanie w reaktorach fuzyjnych. Polskie instytucje biorą udział w analizach nad materiałami odpornymi na intensywne napromieniowanie neutronowe, rozwijają elementy infrastruktury nadprzewodzącej oraz współtworzą systemy sterowania i diagnostyki w czasie rzeczywistym. Dzięki temu Polska staje się ważnym ogniwem w europejskim łańcuchu dostaw technologii dla fuzji, co ma duże znaczenie zarówno strategiczne, jak i gospodarcze (Gałkowski & Kubkowska, 2020a,b; Mikulski, 2020).

Znaczenie polskiego udziału w programach fuzyjnych wykracza poza wymiar technologiczny. Udział w pracach EUROfusion i współpraca z głównymi światowymi laboratoriami umożliwiają rozwój krajowych kompetencji i zwiększają gotowość Polski do uczestnictwa w budowie przyszłych elektrowni fuzyjnych. Tworzenie wyspecjalizowanej kadry inżynierskiej i badawczej może w długiej perspektywie stać się jednym z filarów rozwoju krajowego sektora wysokich technologii, a także wzmacniać bezpieczeństwo energetyczne poprzez przygotowanie gruntu pod ewentualne wdrożenie fuzji w polskim miksie energetycznym.

Rozwój badań nad fuzją termojądrową w Polsce pokazuje, że mimo braku własnej, dużej infrastruktury eksperymentalnej, kraj jest aktywnym uczestnikiem

globalnego postępu w tej dziedzinie. Dzięki współpracy w ramach EUROfusion, rosnącym kompetencjom IFPiLM oraz konsolidacji środowiska naukowego wokół CeNTE, Polska buduje pozycję partnera dostarczającego rozwiązania diagnostyczne dla największych światowych projektów fuzyjnych. Oznacza to, że w dłuższej perspektywie kraj może nie tylko korzystać z efektów transformacji energetycznej opartej na fuzji, ale także realnie współtworzyć jej fundamenty technologiczne i kadrowe.

## Zakończenie

Przeprowadzona analiza wskazuje, że energetyka termojądrowa zajmuje coraz ważniejsze miejsce w debacie o długofalowym kształcie systemu energetycznego i bezpieczeństwie energetycznym państw. W odróżnieniu od klasycznych źródeł opartych na paliwach kopalnych, fuzja termojądrowa oferuje perspektywę znacznego ograniczenia emisji gazów cieplarnianych, przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej stabilności dostaw energii. W tym sensie może stać się uzupełnieniem i wzmocnieniem systemów opartych na źródłach odnawialnych, które z natury są niestabilne i wymagają rozbudowanej infrastruktury magazynowania lub rezerwowych mocy konwencjonalnych.

Kluczowe programy badawcze, takie jak ITER, JT-60SA czy STEP, pokazują, że fuzja przeszła już etap czysto koncepcyjny i wkracza w fazę rozwoju dużych instalacji demonstracyjnych. Jednocześnie skala tych projektów unaocznia, jak złożone są to przedsięwzięcia: wiążą się one z ogromnymi kosztami, wymagają wysokospecjalistycznej kadry i wieloletniej, stabilnej współpracy międzynarodowej. Oznacza to, że rozwój fuzji nie jest wyłącznie kwestią postępu technologicznego, lecz także trwałości instytucji, zdolności politycznych do utrzymania długoterminowych programów badawczych oraz wypracowania odpowiednich ram prawnych i regulacyjnych.

Energetyka termojądrowa nie jest jednak pozbawiona ograniczeń i ryzyk. Po pierwsze, horyzont czasowy komercjalizacji pozostaje długi, co sprawia, że fuzja nie może zostać uznana za rozwiązanie bieżących problemów energetycznych, lecz raczej za potencjalny filar bezpieczeństwa energetycznego w drugiej połowie XXI wieku. Po drugie, istnieje ryzyko powstania nowych nierówności technolo-

gicznych pomiędzy państwami uczestniczącymi w projektach fuzyjnych i dysponującymi odpowiednim kapitałem wiedzy, a państwami, które pozostaną jedynie odbiorcami gotowych technologii. Może to przełożyć się na asymetrię w dostępie do taniej i stabilnej energii, a w konsekwencji – na nowe podziały geopolityczne.

Po trzecie, wybrane elementy infrastruktury fuzyjnej i towarzyszących jej systemów (np. zaawansowane technologie materiałowe, systemy sterowania, rozwiązania kriogeniczne czy diagnostyka plazmy) mają potencjalnie podwójny charakter – cywilny i wojskowy. Z jednej strony zwiększa to wrażliwość instalacji na cyberzagrożenia i sabotaż, z drugiej wymusza stworzenie spójnych mechanizmów kontroli i nadzoru międzynarodowego. Bezpieczeństwo infrastruktury krytycznej, obejmującej w przyszłości również instalacje termojądrowe, staje się zatem jednym z głównych wyzwań dla państw planujących rozwój tego typu technologii.

Na tle tych globalnych procesów szczególnego znaczenia nabiera udział Polski w przedsięwzięciach fuzyjnych w ramach konsorcjum EUROfusion oraz innych inicjatyw międzynarodowych. Rozwijane w Polsce kompetencje w obszarze diagnostyki plazmy, materiałów odpornych na ekstremalne warunki czy modelowania numerycznego mogą w przyszłości stanowić ważny kapitał technologiczny i negocjacyjny. Uczestnictwo w projektach badawczych pozwala nie tylko na dostęp do najnowszej wiedzy i infrastruktury, lecz także na kształcenie krajowej kadry specjalistów, którzy będą zdolni wdrażać i obsługiwać systemy fuzyjne, gdy te osiągną dojrzałość komercyjną.

W konsekwencji, fuzja termojądrowa jawi się jako technologia o wysokim potencjale transformacyjnym, lecz wymagająca realistycznego podejścia. Z jednej strony może ona znacząco wzmocnić bezpieczeństwo energetyczne, ograniczyć presję na środowisko i złagodzić geopolityczne napięcia związane z dostępem do paliw kopalnych. Z drugiej wymaga długotrwałych inwestycji, świadomej polityki państw, szerokiej współpracy międzynarodowej i budowania społecznej legitymizacji dla kosztownych projektów jądrowych. Fuzja nie zastąpi potrzeby rozwoju odnawialnych źródeł energii, poprawy efektywności energetycznej czy dywersyfikacji dostaw w najbliższych dekadach, może jednak, przy konsekwentnym przezwyciężaniu barier technologicznych, ekonomicznych i instytucjonalnych, stać się jednym z kluczowych filarów systemu energetycznego końca XXI wieku.

# Bibliografia


Allenby, B.R. (2015). *The Applied Ethics of Emerging Military and Security Technologies* (1st ed.). Routledge. https://doi.org/10.4324/9781315241364

American Nuclear Society [ANS]. (2023, 6 listopada). *JT-60SA is now the largest operating tokamak: What does that mean for ITER and JET? Nuclear Newswire.* Pobrano 21.09.2025 z https://www.ans.org/news/article-5512/jt60sa-is-now-the-largest-operating-tokamak-what-does-that-mean-for-iter-and-jet/

Ball, P. (2023, 1 czerwca). *What is the future of fusion energy? Scientific American.* June Issue. Pobrano 10.12.2025 z https://www.scientificamerican.com/article/what-is-the-future-of-fusion-energy/

Bolt, H., Barabash, V., Federici, G., Linke, J., Loarte, A., Roth, J., & Sato, K. (2002). Plasma facing and high heat flux materials – needs for ITER and beyond. *Journal of Nuclear Materials, 307–311,* 43–52. https://doi.org/10.1016/S0022-3115(02)01175-3

Coleman, M., & McIntosh, S. (2019). BLUEPRINT: A novel approach to fusion reactor design. *Fusion Engineering and Design, 139*, 26–38. https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.12.036

Czerniawski, J. (2019). *Energetyka fuzyjna*. Politechnika Warszawska. https://www.if.pw.edu.pl/~pluta/pl/dyd/mtj/zal1/pz21/Jakub-Czerniawski-18-19.pdf

Dickman, S. (1987). Nations meet to plan for world nuclear fusion effort. *Nature 329*, 753. https://doi.org/10.1038/329753a0

Directorate-General for Energy. (2023, 1 grudnia). *EU and Japan celebrate start of operations of the JT-60SA fusion reactor and reaffirm close cooperation on fusion energy*. Pobrano 10.12.2025 z https://energy.ec.europa.eu/news/eu-and-japan-celebrate-start-operations-jt-60sa-fusion-reactor-and-reaffirm-close-cooperation-fusion-2023-12-01_en

Eurofusion. (2022). *European Research Roadmap IN BRIEF to the Realisation of Fusion Energy*. https://euro-fusion.org/eurofusion/roadmap/

European Commission. (2021, 17 maja). *In focus: Fusion power and the ITER project.* https://commission.europa.eu/news-and-media/news/focus-fusion-power-and-iter-project-2021-05-17_en

European Commission. (b.d.). *Fusion energy and ITER.* https://energy.ec.europa.eu/topics/research-and-technology/fusion-energy-and-iter_en

Everllence. (b.d.). *Our Focus: Moving big things to zero.* Pobrano 15.09.2025 z https://www.everllence.com/our-focus

Gałkowski, A., & Kubkowska, M. (2020a). Badania termojądrowe w Polsce. Część 1. *Postępy Techniki Jądrowej, 63*(2), 2–11. https://www.ichtj.waw.pl/ptj/Pliki/ptj2020no2.pdf

Gałkowski, A., & Kubkowska, M. (2020b). Badania termojądrowe w Polsce. Część 2. *Postępy Techniki Jądrowej, 63*(4), 2–9. https://www.ichtj.waw.pl/ptj/Pliki/ptj2020no4.pdf

GlobeNewswire (2025, 24 września). *Global Nuclear Fusion Energy Report 2026–2046: Near- term projections suggest the first comercial Fusion power plants could Begin operation between 2023–2035*. Pobrano 10.12.2025 z https://www.globenewswire.com/news-release/2025/09/24/3155230/0/en/Global-Nuclear-Fusion-Energy-Market-Report-2026-2046-Near-term-Projections-Suggest-the-First-Commercial--Fusion-Power-Plants-Could-Begin-Operation-Between-2030-2035.html

Goddard, S. E., & Larkin, C. (2025). *Nuclear Shibboleths: The Logics and Future of Nuclear Nonuse. International Organization, 79*(1), 117–145. https://doi.org/10.1017/S0020818324000341

Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2023). *Climate change 2023. AR6 synthesis report*. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/

International Atomic Energy Agency [IAEA]. (2023). *IAEA* World *Fusion Outlook 2023. Fusion Energy: Present and Future*. https://doi.org/10.61092/iaea.ehyw-jq1g

International Energy Agency [IEA]. (2023). *World Energy Outlook 2023*. https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023

IPP. (b.d.a). *The IPP and ITER*. Pobrano 17.12.2025 z https://www.ipp.mpg.de/16629/einfuehrung

IPP. (b.d.b). *The ASDEX Upgrade divertor tokamak went into operation at Garching in 1991*. Max Planck Institute for Plasma Physics. Pobrano 17.09.2025 z https://www.ipp.mpg.de/16195/asdex

ITER Organization. (2025). *Fusion energy*. https://www.iter.org/fusion-energy/what-fusion

Japan Atomic Energy Agency [JAEA]. (2023, 6 listopada). *JT-60SA Achieves First Plasma: Another Step Toward Realization of Fusion Energy.* Pobrano 10.12.2025 z https://www.jaif.or.jp/en/news/6769

*JT-60AS. (b.d.). Main Research Objectives of JT-60SA*. https://www.jt60sa.org/wp/

Kroenig, M. (2020). *The Return of Great Power Rivalry: Democracy versus Autocracy from the Ancient World to the U.S. and China*. Oxford University Press. https://doi.org/10.1093/oso/9780190080242.001.0001

Mikulski, A. (2020*). Energetyka jądrowa na świecie i w Polsce w 2019 roku. Postępy Techniki Jądrowej, 63*(2), 18–26. https://www.ichtj.waw.pl/ptj/Pliki/ptj2020no2.pdf

Moskowitz, C., & Twombly, M. (2025, 16 września). *How Fusion Energy Could Power the Future. Scientific American*, October Issue. Pobrano 12.12.2025 z https://www.scientificamerican.com/article/how-three--fusion-reactor-designs-could-power-tomorrow/

OECD Nuclear Energy Agency. (2025). *Roadmaps to New Nuclear 2025: Report for Ministers and CEOs.* OECD Publishing. https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_111410/roadmaps-to-new-nuclear-2025-report-for-ministers-and-ceos

Pao, J. (2025, 28 kwietnia). *National Security at a Crossroads: Fusion Energy's New Strategic Role.* Pobrano 8.12.2025 z https://www.techjournal.uk/p/national-security-at-a-crossroads

Saniawa, D. (2023). *Wybrane zagadnienia z obszaru nowych technologii wytwarzania energii elektrycznej*. SEP Radom. https://sep.radom.pl/img/dionizy-saniawa-wybrane-zagadnienia-z-obszaru-nowych-technologii-wytwarzania-energii-elektrycznej.pdf

Sayler, K.M. (2024). *Emerging Military Technologies: Backgraound an Issues for Congress* (Report 46458, version 13 updated). Congressional Research Service. https://www.congress.gov/crs-product/R46458

Shimada, M., Hara, M., Otsuka, T., Oya, Y., & Hatano, Y. (2015). Defect annealing and thermal desorption of deuterium in low dose HFIR neutron-irradiated tungsten. *Journal of Nuclear Materials, 463,* 1005–1008. https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2014.10.054

The Economist. (2023, 23 marca). *Fusion power is coming back into fashion*. https://www.economist.com/science-and-technology/2023/03/22/fusion-power-is-coming-back-into-fashion

Wampler, W., & Doerner, R. (2009). The influence of displacement damage on deuterium retention in tungsten exposed to plasma. *Nuclear Fusion, 49*(11), 115023. https://doi.org/10.1088/0029-5515/49/11/115023

Wessen, R. R., Borden, C., Ziemer, J., & Kwok, J. (2013). *Space mission concept development using concept maturity levels*. AIAA SPACE 2013 Conference & Exposition (San Diego, California, September 10–12, 2013). JPL Open Repository. Pobrano 20.09.2025 z https://hdl.handle.net/2014/44299

WikanaBioenergia. (2025, 12 września). *Czy fuzja może zostać wykorzystana militarnie*? Pobrano 20.09.2025 z https://wikanabioenergia.pl/czy-fuzja-moze-zostac-wykorzystana-militarnie

World Nuclear Association [WNA]. (2025, 6 września). *Highlights from Executive Plenary — Day Two.* Pobrano 18.09.2025 z https://world-nuclear.org/news-and-media/association-news/highlights-from-executive-plenary-day-two

World Nuclear Association [WNA]. (2025, 5 czerwca). *Nuclear fusion power*. Pobrano 18.09.2025 z https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-fusion-power

World Nuclear News [WNN]. (2025, 16 października). *US Army launches advanced reactor programme.* Pobrano 20.09.2025 z https://www.world-nuclear-news.org/articles/us-army-launches-advanced-reactor-programme