

Kontrolowana synteza termojądrowa ważnym elementem energetyki przyszłości[★]

Abstrakt: Narastające zmiany klimatyczne oraz degradacja środowiska naturalnego wymuszają poszukiwanie stabilnych, bezpiecznych i niskoemisyjnych źródeł energii. Choć odnawialne źródła energii zyskują na znaczeniu, ich niestabilność ogranicza możliwość pełnego pokrycia globalnego zapotrzebowania energetycznego. Tradycyjna energetyka jądrowa, oparta na rozszczepieniu jąder atomowych, wiąże się natomiast z problemami bezpieczeństwa oraz składowania odpadów promieniotwórczych. W artykule przeanalizowano potencjał fuzji termojądrowej jako alternatywnego, niemal niewyczerpywalnego źródła energii. Przedstawiono kluczowe różnice pomiędzy rozszczepieniem a syntezą jądrową, podkreślając wysokie bezpieczeństwo operacyjne reaktorów fuzyjnych oraz brak długotrwałych odpadów radioaktywnych. Omówiono aktualny stan badań nad fuzją, w tym projekt ITER, rosnące zaangażowanie sektora prywatnego oraz przełomowe osiągnięcia badawcze w Chinach i Stanach Zjednoczonych. Wskazano również główne wyzwania technologiczne i ekonomiczne związane z komercjalizacją tej technologii oraz jej potencjalną rolę w przyszłej transformacji energetycznej.

Słowa kluczowe: fuzja termojądrowa, transformacja energetyczna, zmiany klimatyczne, energetyka jądrowa, zeroemisyjne źródła energii

Controlled Nuclear Fusion as a Key Element of Future Energy Systems

Abstract: Accelerating climate change and the ongoing degradation of the natural environment necessitate the search for stable, safe, and low-emission energy sources. Although renewable energy sources are gaining importance, their inherent intermittency limits their ability to fully meet global energy demand. Conventional nuclear power based on nuclear fission, in turn, faces challenges related to safety and the long-term storage of radioactive waste. This article examines the potential of nuclear fusion as an alternative, virtually inexhaustible source of energy. It outlines the key differences between nuclear fission and fusion, emphasizing the high operational safety of fusion reactors and the absence of long-lived radioactive waste. The paper discusses the current state of fusion research, including the ITER

[★] Na podstawie: *Kontrolowana synteza termojądrowa ważnym elementem energetyki przyszłości*, w: „Wszystko co najważniejsze”, <https://wszystkoconajwazniejsze.pl/prof-michal-kleiber-fuzja-termojadrowa-energetyka-przyszlosci/> (dostęp: 30.11.2025).

project, the growing involvement of the private sector, and recent scientific breakthroughs in China and the United States. It also identifies the major technological and economic challenges associated with the commercialization of fusion technology, as well as its prospective role in the future global energy transition.

Keywords: nuclear fusion; energy transition; climate change; nuclear energy; zero-emission energy sources

Większość osób na świecie nie ma wątpliwości dotyczących zachodzących zmian klimatu i niebezpieczeństwa ich konsekwencji. Osoby te wierzą w ogromną ilość szeroko dostępnych informacji i opinii badaczy przewidujących już w najbliższych dekadach narastające fale groźnych upałów, wzrost poziomu mórz wywołujący rozległe zniszczenia, problemy z dostępem do wody pitnej, rosnące zagrożenie huraganami i nawałnicami deszczów, dramaty ludności zamieszkującej rejony nadmorskie bądź okołorównikowe i wiele, wiele innych nieszczęść. Istnieją też sceptycy konsekwentnie uważający przepowiadanie takich wydarzeń za przesadne i niewarte olbrzymich nakładów finansowych potrzebnych do skutecznej z nimi walki. Jednak nawet owi sceptycy w większości się zgadzają, że nie można odmówić realności problemom trwającej dewastacji środowiska naturalnego i zanieczyszczenia powietrza, które mają niezaprzeczalny, bardzo negatywny wpływ na zdrowie człowieka. Poprawa tej sytuacji wymaga zasadniczych zmian w energetyce, transporcie i wielu innych obszarach życia, a kluczową postulowaną zmianą jest oczywiście stopniowe odchodzenie od paliw kopalnych. Dzisiejsze alternatywy dla węgla, gazu i ropy są jednak dalekie od satysfakcjonujących – źródła odnawialne wykorzystujące słońce, wiatr i przepływy wody są niestabilne i generują ciągle relatywnie małą część potrzebnej energii. Za dobrą alternatywę uważana jest powszechnie energetyka jądrowa, ale i ona w dotychczas stosowanej tradycyjnej wersji ma swoje istotne wady. Bazuje bowiem na reakcji rozczepienia jąder atomów w procesie ich zderzania, wymagającym bardzo skrupulatnej kontroli i użycia pierwiastków ciężkich, których atomy po rozpadzie wytwarzają radioaktywne śmieci. W dodatku dostępność pierwiastków potrzebnych w tym procesie staje się w dzisiejszym świecie coraz bardziej problematyczna.

Odpowiedzią na powyższe trudności jest rosnące zainteresowanie innym sposobem wykorzystania jądrowej generacji energii – fuzją termojądrową lub kontrolowaną syntezą termojądrową. Terminy te oznaczają odtworzenie w kontrolowanych warunkach procesów zachodzących w jądrze słońca. W reaktorze fuzyjnym zachodzi reakcja odwrotna do opisanej wyżej – zamiast rozbijać jądra atomów należy doprowadzić do ich połączenia. Prowadzi to do dość istotnych różnic między nimi, wśród których może najważniejsze są dwie. Po pierwsze, w reaktorze termojądrowym nigdy nie zajdzie niekontrolowana reakcja łańcuchowa, więc nie ma niebezpieczeństwa awarii takiej jak w Fukushima czy Czarnobylu. Druga różnica to brak odpadów radioaktywnych, które w przypadku reaktorów rozszczepieniowych trzeba przechowywać przez tysiące lat w bezpiecznym miejscu.

Jedyną substancją radioaktywną, która mogłaby zostać uwolniona do otoczenia w wyniku awarii reaktora termonuklearnego, jest tryt o połowicznym okresie rozpadu wynoszącym tylko około 12 lat.

W przeciwieństwie do tradycyjnej energetyki jądrowej, uznawanej obecnie w krajach takich jak Niemcy czy Japonia za stwarzającą istotne zagrożenia dla środowiska naturalnego, reaktory termojądrowe uważane są za praktycznie niewyczerpywalne źródła energii przyjaznej człowiekowi. Wiele jąder atomowych może służyć w nich jako paliwo, a najkorzystniejsze wydaje się dzisiaj doprowadzanie do syntezy jąder deuteru i trytu, czyli izotopów wodoru. Paliwo takie byłoby w zasadzie darmowe i właśnie dlatego większość badań prowadzona jest w tym kierunku. Prace badawcze dotyczące praktycznego wykorzystywania fuzji do generowania energii trwają już od paru dziesięcioleci, ale do niedawna trudno było być w tej sprawie optymistą. Mam tu swoje osobiste doświadczenie – w latach 2004–2005 byłem z ramienia UE jednym z negocjatorów w sprawie inicjatywy dotyczącej utworzenia międzynarodowego centrum badawczego ITER dotyczącego budowy eksperymentalnego reaktora fuzyjnego, tzw. tokamaka, w Cadarache w południowej Francji. Negocjacje zakończyły się powodzeniem i w 2006 roku Japonia, Korea Południowa, Chiny, Indie i Unia Europejska podpisały w tej sprawie kluczowe porozumienie. Inicjatywa miała wielu krytyków, czego doświadczałem osobiście w licznych rozmowach z politykami, ekspertami, a nawet bardzo kompetentnymi fizykami niewierzącymi w jej powodzenie. Nie przeszkodziło to idei fuzji termojądrowej w zdobywaniu coraz większej popularności, czego konsekwencją są badania dotyczące jej wykorzystywania prowadzone od lat w wielu miejscach na świecie, także przez prywatne firmy. W finansowanie fuzji zaangażowani są nie tylko znani giganci energetyczni, na przykład Chevron, lecz także osoby i firmy dotychczas niezwiązane z branżą energetyczną – Bill Gates czy Google. Złożoność prowadzonych badań jest niezaprzeczalnym faktem. Przykładowo koszt przygotowań do budowy eksperymentalnego reaktora termonuklearnego, tokamaka ITER, szacowany początkowo na parę miliardów euro został już bardzo znacznie przekroczony. A i tak ITER, budowany na wzór działającego obecnie mniejszego tokamaka JET, nie jest planowany do pełnienia funkcji komercyjnej elektrowni, jest bowiem w zamierzeniu ciągle projektem demonstracyjnym i typowo badawczym. Współcześnie potrafimy wywoływać reakcję termojądrową w bombach termojądrowych (chciałoby się dodać – niestety!) oraz, na niewielką skalę, w urządzeniach badawczych. Powodem tych ograniczeń jest poważny problem związany z budową takich reaktorów. Aby wywołać odpowiednią reakcję, potrzebne jest podgrzanie plazmy w reaktorze do temperatury rzędu dziesiątków milionów stopni Celsjusza, a to jest bardzo trudne i w dodatku wymaga dostarczenia dużej ilości energii. Innymi słowy, aby produkować energię, trzeba najpierw wykorzystać jej znaczną ilość. Dotychczas ten energetyczny bilans wypadał zawsze ujemnie, czyli inwestycja się po prostu nie zwracała. Do niedawna przewidywano, że kraje biorące udział w budowie reaktora ITER rozwiną technologię, która przynajmniej pozwoliłaby na skonstruowanie prototypowej elektrowni termojądrowej. Nie wydawało się jednak realne, aby taka elektrownia powstała przed rokiem 2040. Nadzieje rozbudziły w ostatnich latach wielkie pieniądze na badania pochodzące ze wspomnianych firm prywatnych, których właściciele obiecują, że w ciągu

dosłownie paru lat zostaną uruchomione reaktory pilotażowe, zaś rozwiązania komercyjne będą gotowe już na początku lat 30., dostarczając zeroemisyjną energię nieograniczoną dostępnością zasobów.

Nie sposób w tym miejscu nie wspomnieć o ciągle nie do końca rozwiązany ważnym problemie opóźniającym budowę komercyjnych elektrowni termojądrowych. O ile we wspomnianych wyżej bombach wodorowych krótkotrwała reakcja termonuklearna jest opanowana pod względem technicznym, o tyle dotychczas nie udało się przeprowadzić kontrolowanej, długotrwałej reakcji termojądrowej z dodatnim wynikiem energetycznym. Powodem jest potrzeba dłuższego podtrzymywania wspomnianej bardzo wysokiej temperatury plazmy, w której zachodzi reakcja. Trudno sobie w tej sytuacji wyobrazić reaktor, w którym plazma o takiej temperaturze miałaby kontakt ze ściankami urządzenia. Najlepszym, obecnie dokładnie badanym rozwiązaniem jest wykorzystanie faktu, iż plazma jest obdarzona ładunkiem elektrycznym, co umożliwia jej zamknięcie w tzw. pułapce magnetycznej będącej odpowiednio ukształtowanym polem magnetycznym. Ciekawostką w tym kontekście może być fakt, iż pierwszy pomysł na stworzenie takiej pułapki dla plazmy pochodzi z prowadzonych przeszło 60 lat temu prac fizyka Andrieja Sacharowa z Instytutu Energii Atomowej w Moskwie – uczonego szanowanego dzisiaj powszechnie jako aktywnego sowieckiego dysydenta i laureata Pokojowej Nagrody Nobla. Zaproponowana przez niego komora będąca pułapką magnetyczną dla plazmy deuterowo-trytowej została nazwana powszechnie dzisiaj stosowanym i użytych już wyżej określeniem tokamak, pochodzącym od rosyjskiej nazwy Toroidalna Kamiera s Magnitnymi Katuszkami.

Ważnym, budzącym nadzieję krokiem na drodze do zbudowania komercyjnego reaktora termojądrowego był niedawny sukces badaczy chińskich, którzy w styczniu 2023 roku osiągnęli w reaktorze EAST temperaturę prawie pięciokrotnie wyższą od temperatury słońca i utrzymali ją przez 17 minut. Historyczną w omawianym kontekście datą okazał się też dzień 5 grudnia 2022 roku, kiedy to naukowcy z kalifornijskiego Lawrence Livermore National Laboratory dostarczyli do fuzyjnego reaktora 2,05 MJ (megadżula) energii, odzyskując 3,15 MJ energii. Powyższe wydarzenia zasadniczo zwiększyły optymizm wszystkich zwolenników fuzyji.

W wyścigu państw o pierwszeństwo w dostępie do nieograniczonych źródeł energii produkowanych przez reaktory termojądrowe bardzo aktywną rolę odgrywają od pewnego czasu Niemcy. Podana w pierwszych dniach października 2025 roku zapowiedź niemieckich naukowców i polityków zbudowania do 2030 roku pierwszego na świecie reaktora termojądrowego spotkała się z powszechnym zainteresowaniem. Niemiecki rząd przyjął „Plan działań na rzecz syntezy jądrowej”, w ramach którego ma tam niebawem powstać wielki ekosystem syntezy jądrowej łączący naukę i przemysł. Kwota środków finansowych przeznaczona na działania prowadzone w ramach tego programu ma wynieść 2 mld euro, ze szczególnym zwiększeniem nakładów na badania naukowe. Wyznaczony cel jest ambitny – Niemcy chcą stać się gospodarzem pierwszej na świecie komercyjnej elektrowni termojądrowej.

Zauważmy jednak, że pewnym problemem dotyczącym każdej innowacji o potencjalnie wielkim znaczeniu jest zawsze koszt jej wdrożenia i eksploatacji. Dobrą wiadomością

jest tu fakt, iż przyszłe elektrownie termojądrowe – niebędące urządzeniami badawczymi – nie będą potrzebowały drogich instrumentów do badania plazmy umożliwiającej diaognozowanie i kontrolowanie parametrów wyładowania, niezbędnych obecnie do eksperymentów z ITER-em. Mimo tego koszty budowy tych elektrowni wydają się dzisiaj być i tak relatywnie wysokie. W tym kontekście z pewnością trzeba jednak przypomnieć historię rozwoju innych innowacyjnych źródeł energii. Na przykład wykorzystywane obecnie powszechnie odnawialne źródła energii w postaci farm fotowoltaicznych czy wiatrowych dwie dekady temu zdawały się być kosztownym hobby dostępnym tylko dla najbogatszych państw, a dziś energia elektryczna uzyskana z OZE okazuje się być tańsza od tej produkowanej z węgla.

Podsumowując, należy podkreślić potencjalne zalety fuzji termojądrowej:

- jest to w istocie niewyczerpywalne źródło energii, bowiem dostęp do potrzebnych materiałów jest praktycznie nieograniczony,
- nie występuje emisja szkodliwych gazów cieplarnianych,
- wysoka efektywność energetyczna, czyli generowanie znacznie większej ilości energii z mniejszej ilości paliwa w porównaniu do konwencjonalnych źródeł energii, w tym energii jądrowej z rozszczepienia,
- brak długotrwałych odpadów radioaktywnych,
- wysokie bezpieczeństwo operacyjne,
- niezawodność w działaniu w długiej perspektywie czasowej.

Rozważając przyszłość energetyki, nie sposób nie wspomnieć choćby jednym zdaniem o innych czekających nas nowościach. Mam tu na myśli na przykład bardzo głęboką geotermię czy produkowany ekologicznie tzw. zielony wodór. Jednak omówienie tych technologii i ich zastosowań wykracza już poza ramy tego tekstu.