

Energetyka fuzyjna jako przyszłość energetyki światowej

Fusion energy as the future of global energy

Wojciech Kramarek^{1*}

¹ Państwowa Akademia Nauk Stosowanych Im. Ignacego Mościckiego w Ciechanowie, Wydział Inżynierii i Ekonomii,

* Kontakt / Correspondence: wojciech.kramarek@pansim.edu.pl

Streszczenie:

Pierwszy na świecie reaktor jądrowy, o znikomej mocy, zwany „stosem atomowym,” w którym uzyskano kontrolowaną reakcję łańcuchową uruchomiono w grudniu 1942 roku na uniwersytecie w Chicago. Kierownikiem projektu był fizyk Enrico Fermi. Pierwszą na świecie instalację do wytwarzania energii elektrycznej ze źródłem ciepła w postaci reaktora jądrowego uruchomiono w 1951 r. w Stanach Zjednoczonych. Powstanie bomby wodorowej w 1952 r. rozpoczęło prace nad wykorzystaniem energii termojądrowej. Reaktor termojądrowy, fuzyjny to reaktor jądrowy realizujący kontrolowaną syntezę termojądrową lekkich jąder wodoru (deuteru i trytu) w wyniku której powstaje jądro helu, wolny neutron i uwalnia się duża ilość energii. Do poprawnego działania reaktora potrzebne jest wytworzenie bardzo wysokiej temperatury powodującej powstanie plazmy czyli mieszaniny zjonizowanych atomów deuteru i trytu. Potrzebne są także potężne elektromagnesy mające na celu utrzymanie plazmy z dala od ścian reaktora. Do tej pory nie udało się skonstruować reaktora fuzyjnego działającego efektywnie, tj. dającego zysk energii i działającego w sposób ciągły. Obecnie trwające projekty reaktorów termojądrowych to m.in. ITER (Międzynarodowy Eksperymentalny Reaktor Termojądrowy) we Francji i EAST (ang. The Experimental Advanced Superconducting Tokamak) w Chinach.

Słowa kluczowe: Energetyka jądrowa, bomba atomowa, bomba wodorowa, reaktor nuklearny, reaktor jądrowy, reaktor fuzyjny, bezpieczeństwo, systemy bezpieczeństwa pasywne i aktywne, normowanie europejskie i światowe

Abstract:

The world's first low-power nuclear reactor, called an „atomic pile,” in which a controlled chain reaction was achieved, was launched in December 1942 at the University of Chicago. Manager of project was Enrico Fermi, famous physicist. The world's first electricity-generating installation with a nuclear reactor as a heat source was launched in 1951 in the United States. The development of the hydrogen bomb in 1952 initiated work on the use of thermonuclear energy. A thermonuclear fusion reactor is a nuclear reactor that carries out controlled thermonuclear fusion of light hydrogen nuclei (deuterium and tritium), resulting in the formation of a helium nucleus, a free neutron and the release of a large amount of energy. For the reactor to function properly, it is necessary to generate a very high temperature that causes the formation of plasma, i.e. a mixture of ionized deuterium and tritium atoms. Powerful electromagnets are also needed to keep the plasma away from the reactor walls. To date, it has not been possible to construct a fusion reactor that operates efficiently, i.e. produces energy gains and operates continuously. Current thermonuclear reactor projects, among others, include ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) in France and EAST (The Experimental Advanced Superconducting Tokamak) in China.

Keywords: Nuclear energy, atomic bomb, hydrogen bomb, nuclear reactor, fusion reactor, safety, active and passive safety systems, european and world norms

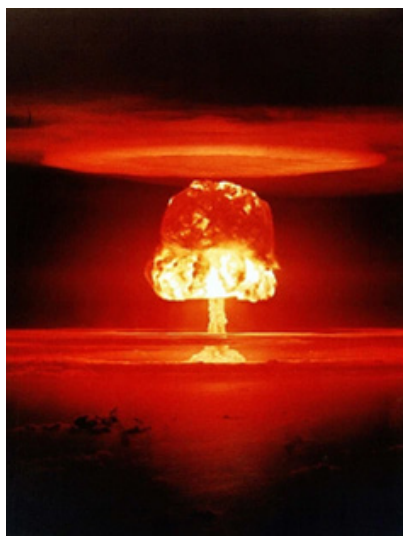
1. Wprowadzenie w energetykę jądrową

W 1938 roku fizycy niemieccy Otto Hahn i Fritz Strassmann przeprowadzili pierwszą na świecie reakcję rozszczepienia jądra atomu.

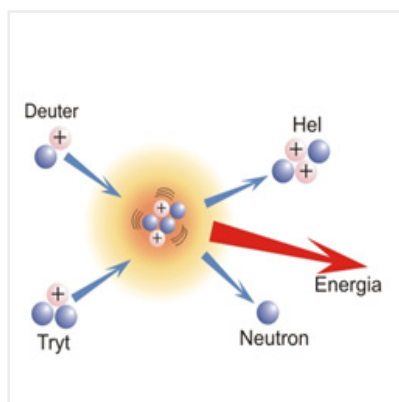
W lutym 1939 roku Hahn i Strassmann przewidzieli wyzwolenie dodatkowych neutronów w czasie rozpadu atomowego czyli powstanie reakcji łańcuchowej. Reakcja

łańcuchowa została udowodniona przez Frédérica Joliot i jego współpracowników w marcu 1939 roku.

W 1933 r. emigrant węgierski fizyk Leo Szilárd, wpadł na pomysł jądrowej reakcji łańcuchowej jako sposobu na jednoczesne uwolnienie i wykorzystanie energii zawartej w atomach. Kilka lat później austriacka naukowiec Lise Meitner i jej siostrzeniec, fizyk Otto Frisch, zauważyli że atom uranu bombardowany neutronami podzieli się na



Rys. 1. Eksplozja ładunku atomowego [12]
Fig. 1. Atomic charge explosion [12]



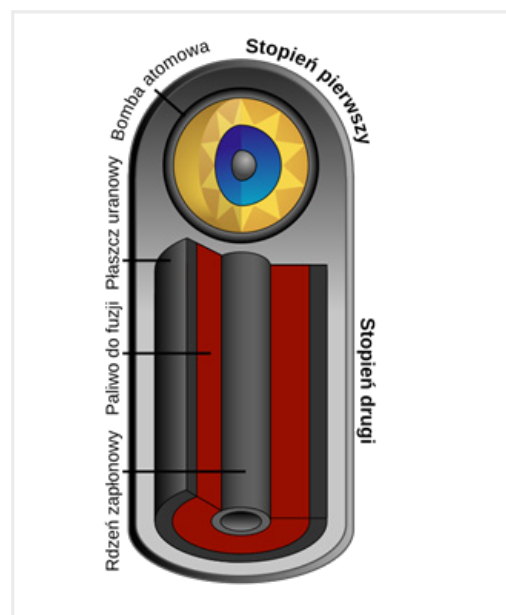
Rys. 2. Reakcja fuzji jądrowej deuteru i trytu, produktami są hel i neutron oraz wydzielą się bardzo dużo energii [12]
Fig. 2. Nuclear fusion reaction of deuterium and tritium, the products are helium and a neutron, and a lot of energy is released [12]

dwie części. Naukowcy wywnioskowali, że w ten sposób można wywołać reakcję łańcuchową, która wyemituje ogromną ilość energii.

Wraz z postępem badań atomowych rosły w obozie aliantów obawy dotyczące programu nazistowskich Niemiec, który mógłby wykorzystać energię atomu do opracowania broni o ogromnej sile rażenia. 2 sierpnia 1939 r. Einstein po rozmowie z Szilardem podpisał list skierowany do prezydenta USA Franklina D. Roosevelta, ostrzegając go przed militarnymi zastosowaniami nowego źródła energii i potencjalnym projektem budowy broni jądrowej w nazistowskich Niemczech. Biorąc pod uwagę ostrzeżenie prezydent Franklin Delano Roosevelt podjął decyzję o uruchomieniu w 1942 r. programu Manhattan noszącego oficjalną nazwę Manhattan Engineering District. Był to amerykański rządowy, tajny program badawczy, którego celem było uzyskanie energii jądrowej i wykorzystanie jej do produkcji nowego typu broni czyli bomby atomowej.

Konstrukcję bomby opracowano w Los Alamos National Laboratory pod kierunkiem dyrektora naukowego projektu, wybitnego fizyka Roberta Oppenheimera. Bomba atomowa to broń masowego rażenia, która wykorzystuje kontrolowaną reakcję łańcuchową rozszczepienia ciężkich jąder atomowych, takich jak uran-235 lub pluton-239. Neutron uderzając w jądro uranu U-235 powoduje jego rozpad. Rozszczepiany atom emituje neutrony, które powodują rozpad następnych jąder atomowych. Rozzerwanie pojedynczego atomu nie daje dużo energii. Z każdego rozzerwania, z każdego rozszczepienia, będzie jej mało, ale w sumie przy olbrzymiej ilości atomów biorących udział w rozpadzie, uzyskamy olbrzymią ilość energii.

Program miał też swoją część zmierzającą do opracowania sposobów niedestrukcyjnego użycia energii atomowej, dzięki czemu opracowano konstrukcje i wyprodukowano pierwszy reaktor jądrowy. Wykorzystywał on (podobnie jak obecnie działające reaktory) reakcje rozszczepienia jąder atomowych. Pierwszy reaktor (uranowo-grafitowy), Chicago Pile no. 1 („Stos chicagowski nr 1”, CP-1) o małej mocy zbudowany został na Uniwersytecie



Rys. 3. Bomba termojądrowa według projektu Ulama-Tellera [15]
Fig. 3. Thermonuclear bomb designed by Ulam-Teller [15]

w Chicago pod kierunkiem włoskiego uczonego Enrica Fermiego. Pierwsza kontrolowana reakcja łańcuchowa została w nim zapoczątkowana 2 grudnia 1942.

16 lipca 1945 r. przeprowadzono pierwszy w historii testowy wybuch bomby atomowej („Gadżet” / „Trinity”) w stanie Nowy Meksyk, a niedługo potem zrzucono dwie bomby na japońskie miasta Hiroszimę i Nagasaki, co przyspieszyło zakończenie wojny.

W czasie pracy nad projektem pojawił się w pomysł opracowania bomby wodorowej, czyli broni o jeszcze większej sile rażenia niż bomba atomowa. Bomba miała wykorzystać zjawisko fuzji nuklearnej. W czasie tej reakcji izotopy wodoru (najczęściej j deuter i tryt) łączą się pod wpływem bardzo wysokiej temperatury, tworząc hel w procesie fuzji nuklearnej. Przy tej reakcji powstaje niekontrolowana i samopodtrzymująca się reakcja łańcuchowa, której towarzyszy wyzwolenie olbrzymiej ilości energii.



Rys. 4. Amerykańska bomba wodorowa B53 o równoważniku trotylowym 9 MT [15]
Fig. 4. American B53 hydrogen bomb with a TNT equivalent of 9 MT[15]

Nad tym projektem, wtedy nazwanym „Super”, pracował znany fizyk, emigrant węgierski Edward Teller, który w trakcie ostatnich kilkunastu miesięcy istnienia Projektu Manhattan zajmował się tylko i wyłącznie tym tematem.

Po zakończeniu II wojny światowej wydawało się, że nie będzie potrzeby zbudowania bomby wodorowej. Dopiero pierwszy udany test broni jądrowej w wykonaniu Rosjan, w 1949 r., przekonał Amerykanów, iż istnieje potrzeba dokończenia tego projektu. Problem polegał na tym, że Teller oraz inni fizycy nie potrafili zaprojektować tego typu uzbrojenia. Przełomem okazały się dopiero rozwiązania polskiego matematyka, pracującego w USA współpracownika Tellera, Stanisława Ulama, dzięki czemu ostatecznie udało się stworzyć tą broń.

Ulam wpadł na pomysł, aby ukierunkować falę uderzeniową mechanicznego wybuchu jądrowego w celu skompresowania paliwa fuzyjnego. Zalety tego rozwiązania szybko dostrzegł Teller, a niedługo później wykorzystał je do zbudowania działającego ładunku termojądrowego, który dziś jest często opisywany mianem „konstrukcji Tellera-Ulama”.

2. Reaktory fuzyjne

Badania nad reaktorami fuzyjnymi rozpoczęły się w latach 40. XX wieku.

Fuzja jądrowa to potencjalna metoda wytwarzania energii elektrycznej z ciepła uwalnianego w reakcjach syntezy jądrowej.

Reaktor fuzyjny to urządzenie, które ma na celu kontrolowane wytwarzanie energii poprzez syntezę (fuzję) lekkich jąder atomowych izotopów wodoru (deuteru i trytu) w cięższe jądra

(helu), naśladując procesy zachodzące w Słońcu i innych gwiazdach.

W wyniku reakcji egzotermicznej powstającej w gwieździe wydzielona energia (w postaci energii kinetycznej produktów i promieniowania gamma), zostaje rozproszona na otaczających atomach i przekształca się na energię słoneczną i ciepłą.

Obecny świat stara się obecnie szybko dekarbonizować i przyspieszyć przejście od paliw kopalnych, które zużywają ogromne ilości energii, na rzecz odnawialnych źródeł energii, takich jak energia słoneczna, wiatrowa i wodna. Źródła te w sytuacjach braku słońca i wiatru nie zapewniają żadnych dostaw energii. Niektóre kraje stawiają na energię pochodzącą z rozszczepienia jądrowego, która jest niskoemisyjna, ale wiąże się z niewielkim, choć nie pomijalnym, ryzykiem katastrofy, problemami ze składowaniem odpadów radioaktywnych i wysokimi kosztami.

W przeciwieństwie do obecnie stosowanej energii pochodzącej z rozszczepienia jądrowego, fuzja jądrowa nie wytwarza odpadów radioaktywnych, co oznacza, że może być pierwszym krokiem w kierunku zmniejszenia naszej zależności od paliw kopalnych i stworzenia nieograniczonego, czystego źródła energii w czasach, gdy ludzkość mierzy się z kryzysem klimatycznym.

Wykorzystanie energii syntezy jądrowej w warunkach ziemskich dałoby olbrzymią ilość energii. Energia wytwor-

zona w ten sposób powinna minimalnie wpływać na środowisko. Ocenia się, że jeden gram mieszanki paliwowej deuteru i trytu w procesie syntezy jądrowej wytwarza 90 000 kilowatogodzin energii, czyli równowartość 11 ton węgla. Elektrownia węglowa o mocy 1000 MW wymaga niemal 3 milionów ton węgla rocznie. Elektrownia fuzyjna o tej samej mocy potrzebuje do tego jedynie 125 kg deuteru i 125 kg trytu.

Deuter można pozyskiwać ze wszystkich form wody, jest uzyskiwany przy produkcji „ciężkiej wody.” Tryt znacznie trudniej znaleźć w naturze. Rzadkość występowania trytu wynika z jego krótkiego okresu rozpadu połowicznego. Ten radioaktywny izotop wodoru powstaje w naturze tylko w górnych warstwach atmosfery w niewielkich ilościach. Tryt można jednak wytwarzać w samym reaktorze fuzyjnym. Izotop ten powstaje w wyniku kontaktu neutronów uciekających, z wytworzonej w reaktorze plazmy, z litem tworzącym wewnętrzną osłonę reaktora.

3. Zasada działania

Proces syntezy wymaga ekstremalnych warunków, aby pokonać siły elektrostatycznego odpychania między dodatnio naładowanymi jądrami. Wymagane warunki to:

Ekstremalna temperatura. Paliwo musi być podgrzane w komorze urządzenia do temperatury rzędu 100 milionów stopni Celsjusza (ponad sześciokrotnie więcej niż temperatura jądra Słońca), przechodząc w stan skupienia zwany plazmą (zjonizowany gaz składający się z wolnych elektronów i jąder atomowych).

Odpowiednie ciśnienie i uwięzienie. Plazma musi być utrzymywana z dala od ścian reaktora przez wystarczająco długi czas, aby nie zniszczyć materiału komory.

Reakcje termojądrowe zachodzą w wyniku zbliżenia się jąder na odległość odpowiadającą zasięgowi sił jądrowych (ok. 1 fm), co jest możliwe po pokonaniu elektrostatycznej bariery kulombowskiej wzajemnego odpychania jąder; reakcje termojądrowe mogą więc zachodzić albo przy dużej energii zderzających się jąder, co odpowiada temperaturze rzędu 10⁸ milionów stopni K, albo przy zniekształceniu bariery kulombowskiej (np. zwężeniu, występującym pod olbrzymim ciśnieniem panującym w gwiazdach, gdy gęstość materii przekracza 10⁴ g/cm³).

Na Ziemi, ze względu na brak potężnego pola grawitacyjnego występującego w gwiazdach, stosuje się głównie dwie metody syntezy jąder:

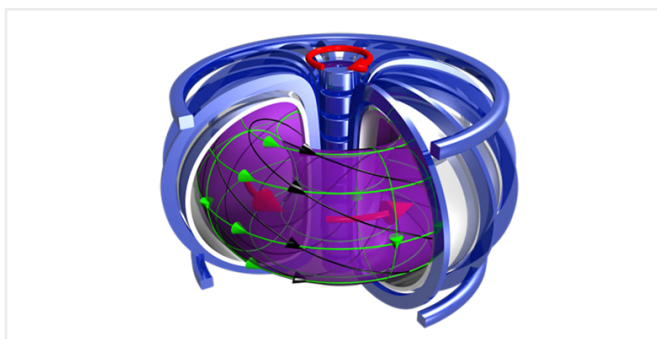
1. Magnetyczne uwięzienie (magnetic confinement fusion, MCF),
2. Inercyjne uwięzienie (inertial confinement fusion, ICF).

4. Magnetyczne uwięzienie

W metodzie magnetycznego uwięzienia (MCF) wykorzystuje się silne pola magnetyczne w urządzeniach nazywanych tokamakami lub stellaratorami. Urządzenia wykorzystują silny prąd elektryczny do rozbicia izotopów wodoru, deuteru i trytu umieszczonych w komorze reaktora odrywając elektrony od jąder i tworząc plazmę



Rys. 5. Widok komory reaktora fuzyjnego [5]
Fig. 5. View of the fusion reactor chamber [5]



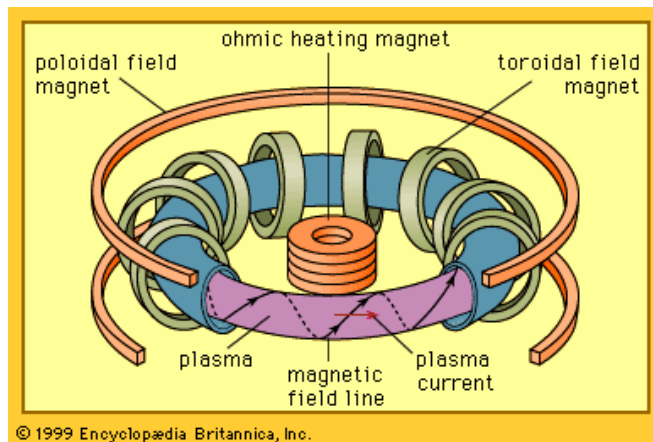
Rys. 7. Zasada działania tokamaka. Plazma jest skupiona w centralnej części komory w kształcie pierścienia (obwarzanka), która jest nazywana torusem. Cewki nadprzewodnikowe generują pole magnetyczne, pod wpływem którego cząstki naładowane plazmy krążą po okręgach, nie dotykając ścian komory [5]
Fig. 7. The operating principle of a tokamak. Plasma is concentrated in the central part of a ring-shaped chamber, called a torus. Superconducting coils generate a magnetic field, which causes the charged plasma particles to circulate in circles without touching the chamber walls [5]

— gorący, naładowany elektrycznie gaz. W plazmie elektrony są odrywane od atomów. Atom, w którym nie ma elektronów krążących wokół jądra, nazywany jest zjonizowanym i nosi nazwę jonu. W rezultacie plazma składa się z jonów i swobodnych elektronów. Oba typy reaktorów wykorzystują fakt, że naładowane cząstki reagują na siły magnetyczne do kontrolowania i ograniczania wytworzonej plazmy w toroidalnej komorze reaktora. Silne magnesy w reaktorach utrzymują jony w miejscu. Reaktor utrzymuje tę plazmę, oddalając ją od powierzchni materiałów komory (które w przeciwnym razie uległyby zniszczeniu) za pomocą kombinacji pól magnetycznych o geometrii toroidalnej (kształt pączka).

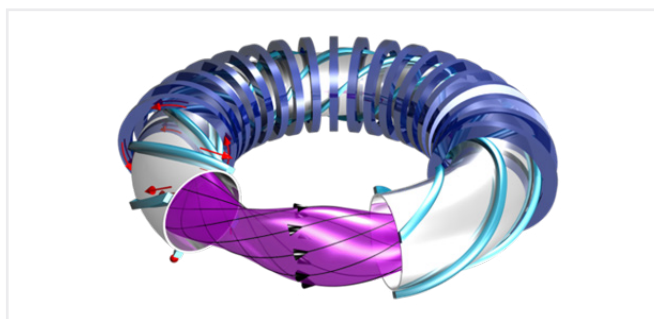
Elektrony są również wiązane przez siły magnetyczne reaktorów. Siły magnetyczne nieustannie obracają cząstki w komorach reaktora, zapobiegając ich ucieczce z plazmy.

Główna komora ma kształt torusa. Dzięki działaniu elektromagnesów tworzony jest pierścień plazmy. Zmienne pole magnetyczne pochodzące z transformatora indukuje prąd elektryczny w pierścieniu gazu. Prąd ten powoduje wyładowania w gazie. Zachodzi jeszcze większa jego jonizacja i ogrzewanie. W końcu tworzy się gorąca plazma. Jest ona utrzymywana w zwartym słupie wewnątrz pierścienia dzięki silnemu polu magnetycznemu.

Gdy cząsteczki plazmy zostają pobudzone i zderzają się,



Rys. 6. Schemat tokamaka [5]
Fig. 6. Tokamak diagram [5]



Rys. 8. Konfiguracja układu magnetycznego typu Stellarator [5]
Fig. 8. Stellarator magnetic system configuration [5]

nagrzewają się, ostatecznie osiągając temperaturę od 100 do 300 milionów stopni Celsjusza. W tym momencie jądra wodoru są tak pobudzone, że mogą przewyższyć swoją naturalną tendencję do odpychania się, dzięki czemu mogą połączyć się, tworząc hel. W tym procesie uwalniają ogromne ilości energii. Utrzymanie stabilności plazmy w celu pozyskania energii jest trudne. Jest ona chaotyczna, supergorąca i podatna na turbulencje oraz inne niestabilności. Współczesna nauka wyjaśniła już wiele problemów wpływających na zachowanie plazmy.

Eksperymentalne tokamaki pracują od dziesięcioleci. Do tej pory jednak wymagały więcej energii do wytworzenia plazmy i jej krótkotrwałego podtrzymania niż generuje fuzja. Uważa się, że współcześnie budowane tokamaki pokonają w przyszłości to ograniczenie.

Pierwszy tokamak, T-1, rozpoczął działalność w Rosji w 1958 roku. Koncepcję tokamaka stworzyli w 1950 Igor Tamm i Andriej Sacharow. Tokamak (skrót od rosyjskich słów oznaczających „toroidalne uwięzienie magnetyczne”) został uruchomiony w Moskwie w połowie lat 60. XX wieku przez radzieckich fizyków plazmowych.

Kolejne postępy doprowadziły do budowy testowego reaktora syntezy jądrowej. Tokamaki w Princeton Plasma Physics Laboratory oraz Joint European Torus w Anglii osiągnęły rekordową moc syntezy jądrowej w latach 90. XX wieku. Te sukcesy zmotywowały 35 krajów do współpracy przy projekcie nadprzewodzącego tokamaka ITER, którego celem jest zbadanie fizyki spalania plazmy. ITER-International Thermonuclear Experimental Reactor, Międzynarodowy Eksperymentalny Reaktor Termojądrowy.

ITER to doświadczalny reaktor fuzyjny budowany w centrum badawczym Cadarache w pobliżu Marsylii, na południu Francji.

Konkurencyjne rozwiązanie w stosunku do tokamaka to stellarator (MS). Stellarator to toroidalne urządzenie do ograniczania pola magnetycznego, w którym transformacja obrotowa pola magnetycznego jest w głównej mierze spowodowana przez kształt zewnętrznych cewek pola magnetycznego. Rozwiązanie zapewnia takie zalety, jak zwiększona stabilność plazmy i możliwość jej utrzymania w stanie ustalonym przez dłuższy czas w porównaniu do tokamaków.

Skrećanie magnesów może nadać im kształt helisy (trójwymiarowa krzywa w kształcie skręconej sprężyny lub śruby) bez konieczności użycia transformatora – taki rodzaj konfiguracji nazywa się stellaratorem. (Zdjęcie: Instytut Fizyki Plazmy im. Maxa Plancka, Niemcy)

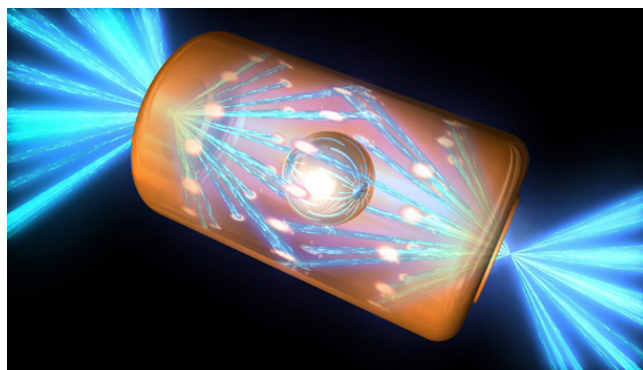
Podstawowa koncepcja fizyczna leżąca u podstaw układu magnetycznego stellaratora (MS) jest bardzo złożona, a wymagania dotyczące dokładności jej wdrożenia są bardziej rygorystyczne niż w przypadku tokamaków. Ponadto, przy tych samych objętościach plazmy, stellarator jest większy niż tokamak. Z tego powodu obecnie tokamak jest uważany za rozwiązanie lepsze, aczkolwiek stellarator ciągle jest traktowany jako jego poważne rozwiązanie konkurencyjne.

Stellaratory pracują bardziej stabilnie niż tokamaki i umożliwiają pracę ciągłą, podczas gdy tokamaki są lepsze w utrzymywaniu wysokiej temperatury plazmy, ale pracują w trybie impulsowym. Główna różnica polega na tym, że stellaratory używają skomplikowanych, zewnętrznych cewek magnetycznych do tworzenia pola w kształcie torusa, podczas gdy tokamaki wykorzystują większy prąd przepływający przez samą plazmę do stworzenia pola.

5. Fuzja inercyjna, Inertial confinement fusion, ICF

Jest to jedna z głównych, wykorzystywanych obecnie, metod produkcji energii z fuzji jądrowej.

Zasada działania ICF (rys. 9) polega na napromieniowaniu milimetrowej kulistej kapsuły wypełnionej deuterem i trytem (DT) promieniowaniem o bardzo dużej mocy przez kilka nanosekund przy pomocy wielu wiązek promieniowania laserowego. Jako paliwo wykorzystywane są izotopy wodoru: deuter i tryt. Odparowanie zewnętrznej powierzchni kapsuły spowodowane działaniem promienia lasera prowadzi do sprężenia paliwa deuter-tryt. To odparowanie powoduje ogromne ciśnienie wewnętrzne, które ścisza paliwo do ekstremalnych gęstości i temperatur wywołując temperaturę (~100 milionów K) wystarczających do zainicjowania reakcji



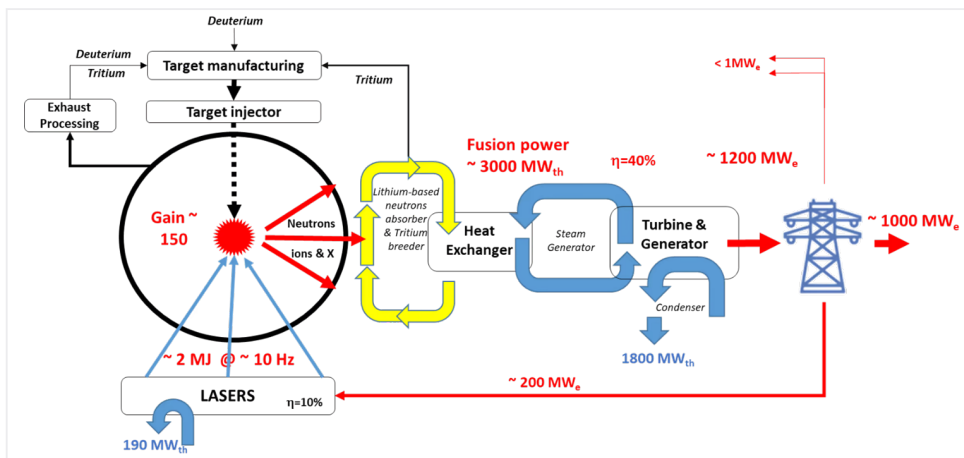
Rys. 9. Wizualizacja przedstawia tarczę National Ignition Facility wewnątrz kapsuły z nieprzezroczystego materiału do której przez otwory na obu końcach wpadają wiązki laserowe. Wiązki sprężają i podgrzewają kapsułę do warunków niezbędnych do zajścia syntezy jądrowej [3]

Fig. 9. The visualization shows the National Ignition Facility shield inside a capsule made of opaque material, with laser beams entering through holes at both ends. The beams compress and heat the capsule to the conditions necessary for nuclear fusion to occur [3]

syntezy jądrowej.

W przypadku paliwa DT większość energii uwalniana jest w postaci cząstek alfa i neutronów. W normalnych warunkach cząstki alfa mogą przemieszczać się przez paliwo na odległość około 10 mm, ale w warunkach ultragęstego sprężonego paliwa mogą one przemieszczać się na odległość około 0,01 mm, zanim ich ładunek elektryczny, oddziałując z otaczającą plazmą, spowoduje utratę prędkości. Większość energii uwalnianej przez cząstki alfa jest ponownie gromadzona w paliwie. Ten transfer energii kinetycznej podgrzewa otaczające cząstki do energii niezbędnej do syntezy jądrowej wywołując temperaturę (~100 milionów K) wystarczającą do zainicjowania reakcji syntezy jądrowej.

Proces ten powoduje, że paliwo termojądrowe spala się w kierunku na zewnątrz od środka. Neutralne elektrycznie neutrony przemieszczają się na większe odległości w masie paliwa i nie przyczyniają się do procesu samonagrzewania. Wytworzone cząstki alfa są następnie ponownie absorbowane w plazmie, co dodatkowo podnosi jej temperaturę i wywołuje dużą reakcję syntezy jądrowej, która może zużyć znaczną część paliwa DT. Osiągnięcie tego



Rys. 10. Schemat działania elektrowni wykorzystującej metodę fuzji inercyjnej [3]

Fig. 10. Schematic diagram of the operation of a power plant using the inertial fusion method [3]

stanu spalania plazmy wymaga niezwykle symetrycznego napromieniowania i bardzo ścisłej tolerancji kapsuły.

Prowadzone eksperymenty nie umożliwiają wytwarzania energii w sposób ciągły, to tylko próby laboratoryjne. Według uproszczonego schematu działania przyszła elektrownia fuzyjna będzie działać zgodnie z zasadą przedstawioną na rys. 10.

Kapsuła wypełniona (około) jednym mg deuteru i trytu jest dostarczana do komory reakcyjnej, gdzie jest napromieniowywana równocześnie wieloma wiązkami laserowymi o energii megadżuli. Implozja kapsuły może doprowadzić do spalania nawet 30% DT, co prowadzi do uwolnienia ponad 100 MJ. Powtarzanie tego procesu wielokrotnie na sekundę spowoduje wygenerowanie średniej mocy rzędu gigawatów, głównie w postaci szybkich neutronów (14,3 MeV).

W przeciwieństwie do uwięzienia magnetycznego, metoda ta nie utrzymuje plazmy przez długi czas, ale używa inercji i gwałtownego impulsu do jej skompresowania.

Po osiągnięciu warunków fuzji, wydzielana jest energia w postaci energii kinetycznej produktów reakcji (głównie neutronów i jąder helu). Energia neutronów jest następnie pochłaniana przez tzw. „płaszcz” (ang. blanket) otaczający rdzeń reaktora, który się nagrzewa. Ciepło to może być wykorzystane do wytwarzania pary, napędzającej turbozespoły generatorów energii elektrycznej lub jako ciepło technologiczne w pewnych obszarach gospodarki.

6. Obecny stan rozwoju i wyzwania energetyki fuzyjnej

Obecnie reaktory fuzyjne wciąż są na etapie badawczym, a największym wyzwaniem pozostaje osiągnięcie dodatniego bilansu energetycznego (produkcja większej ilości energii niż zużywanej do podgrzania i utrzymania plazmy) w sposób ciągły i opłacalny ekonomicznie.

MAEA (Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej) od lat odgrywa kluczową rolę w międzynarodowych badaniach nad syntezą jądrową. W 1960 roku MAEA uruchomiła czasopismo „Nuclear Fusion”, aby wymieniać się informacjami na temat postępów w dziedzinie syntezy jądrowej. Pierwsza międzynarodowa konferencja MAEA poświęcona energii syntezy jądrowej odbyła się w 1961 roku, a od 1974 roku MAEA organizuje konferencję co dwa lata, aby wspierać dyskusję na temat rozwoju i osiągnięć w tej dziedzinie.

7. Zalety energetyki fuzyjnej

Fuzja jądrowa uważana jest obecnie do najbardziej przyjaznych dla środowiska źródeł energii. Proces syntezy jądrowej nie powoduje emisji CO₂, innych szkodliwych gazów ani pyłów do atmosfery. Synteza jądrowa nie przyczynia się do emisji gazów cieplarnianych ani globalnego ocieplenia. Dwa źródła paliwa, wodór i lit, są powszechnie dostępne w wielu częściach świata i łatwe do pozyskania.

W wyniku przebiegu fuzji jądrowej nie powstają żadne długookresowe odpady radioaktywne. Proces ten jest przeciwieństwem rozszczepienia jądrowego opartego na ura-

nie lub plutonie w wyniku którego powstają niestabilne jądra; niektóre z nich są radioaktywne przez tysiące lat emitując szkodliwe dla środowiska promieniowanie.

Reaktor termojądrowy produkuje hel, który jest gazem obojętnym. Produkuje również i zużywa tryt w elektrowni w obiegu zamkniętym. Tryt jest radioaktywny (emiter beta), ale jego okres półtrwania jest krótki. Jest on używany tylko w niewielkich ilościach, więc w przeciwieństwie do długożyjących jąder radioaktywnych, nie może stanowić poważnego zagrożenia.

Produkcja energii z fuzji jądrowej nie opiera się na reakcji łańcuchowej, tak jak rozszczepienie. Aby zachodziła reakcja syntezy wytworzona plazma musi być utrzymywana w bardzo wysokiej temperaturze, wymagając zewnętrznych systemów grzewczych i musi być utrzymywana w zewnętrznym polu magnetycznym. Zmiana konfiguracji roboczej reaktora powoduje schłodzenie plazmy lub utratę jej szczelności. W przypadku powstania takiej sytuacji reaktor automatycznie zatrzymałby się w ciągu kilku sekund, ponieważ proces syntezy zostałby zatrzymany, bez żadnych skutków zewnętrznych. W świetle obecnej wiedzy reaktory fuzyjne są uważane z natury za bezpieczne.

8. Problemy energetyki fuzyjnej

Choć fuzja jest z natury bezpieczniejsza niż rozszczepienie jądrowe, nie jest całkowicie pozbawiona problemów. Neutrony wyzwolane w procesie fuzji mogą degradować materiały reaktora, zmniejszając ich wytrzymałość, powodując kruchość, itp. Z biegiem czasu neutrony mogą skutecznie napromieniować reaktor i otaczające go materiały. Proces ten zależy w dużej mierze od zastosowanych rozwiązań konstrukcyjnych i użytych materiałów. Dodatkowo, tryt, który jest lekko radioaktywnym paliwem, wymaga ostrożnego obchodzenia się z nim, aby nie powstały jego wycieki.

Zagadnienia te stanowią poważne wyzwania dla przyszłych eksperymentów z fuzją.

9. Prognozy dostępności energetyki fuzyjnej

Obecnie testowane laboratoryjnie urządzenia fuzyjne wytwarzają ponad dziesięć megawatów energii z fuzji ale przez bardzo krótki czas. Budowany ITER będzie w stanie wytworzyć 500 megawatów energii z fuzji. Chociaż jest to moc elektrowni zawodowych nadal istnieją pewne problemy technologiczne do rozwiązania, zanim komercyjna elektrownia będzie mogła działać.

Dostęp do komercyjnej energii fuzyjnej to nadal kwestia przyszłości, ale tempo postępu w tej dziedzinie zdecydowanie wzrosło w ostatnich latach. Optymistyczne prognozy sugerują, że pierwsze komercyjne reaktory termojądrowe mogą zacząć działać w latach 40. XXI wieku.

Prywatne firmy pracują nad bardziej kompaktowymi i wydajnymi rozwiązaniami, które mogą przyspieszyć wdrożenie tej technologii. Według ekspertów z tej branży w perspektywie średnioterminowej, czyli do 2050 roku, energia fuzyjna nie zastąpi paliw kopalnych ani odnawial-

nych źródeł energii, ponieważ wciąż pozostaje w fazie eksperymentalnej

10. Istniejące badawcze rozwiązania

Główne projekty badawcze to m.in.:

1. ITER

ITER to skrót od Międzynarodowego Eksperymentalnego Reaktora Termojądrowego (International Thermonuclear Experimental Reactor), czyli wielkoskalowego, międzynarodowego projektu badawczego, którego celem jest zbudowanie i uruchomienie reaktora fuzyjnego w celu sprawdzenia możliwości produkcji energii elektrycznej z kontrolowanej syntezy jądrowej. Projekt, którego realizacja odbywa się we Francji, jest jednym z najbardziej złożonych i kosztownych przedsięwzięć inżynierskich w historii.

ITER to powstający największy na świecie tokamak, mający na celu udowodnić, że fuzja jest opłacalna z naukowego i technicznego punktu widzenia (planowane pierwsze eksperymenty z plazmą w 2030 r., z D-T w 2035 r.).

Przy projektowaniu ITER przyjęto założenie że urządzenie w dużej skali stwarza większy potencjał dla reakcji syntezy jądrowej. Moc wyjściowa w takiej skali rośnie poprawiając zarazem wydajność urządzenia. Jeśli ITER będzie działał zgodnie z planem po osiągnięciu pełnej sprawności w 2035 roku, zużyje 50 megawatów mocy wejściowej, aby wygenerować 500 megawatów energii z syntezy jądrowej w postaci ciepła. Chociaż ITER nie będzie wykorzystywał tej energii do wytwarzania energii elektrycznej, ma on służyć jako doświadczalny model reaktora fuzyjnego w celu rozwiązania wielu problemów naukowych.

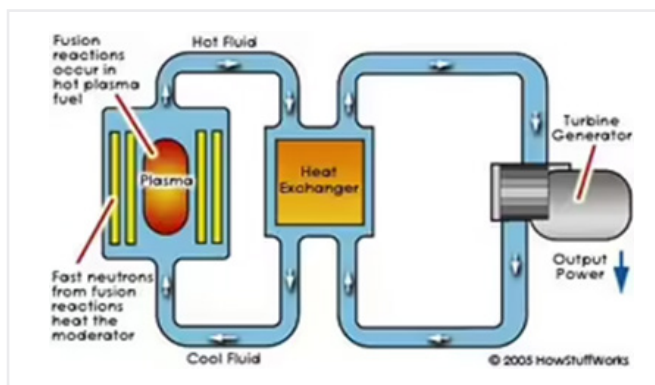
Reaktor fuzyjny będzie podgrzewał strumień paliwa deuterowo-trytowego, tworząc plazmę wysokotemperaturową. Moc potrzebna do rozpoczęcia reakcji syntezy jądrowej wyniesie około 70 megawatów, ale moc wyjściowa reakcji wyniesie około 500 megawatów. Reakcja syntezy jądrowej będzie trwała od 300 do 500 sekund. (Ostatecznie będzie to trwała reakcja syntezy jądrowej).

Koce litowe umieszczone na zewnątrz komory reakcji plazmowej będą absorbować wysokoenergetyczne neutrony z reakcji syntezy jądrowej, wytwarzając więcej paliwa trytowego. Koce będą się również nagrzewać pod wpływem neutronów.



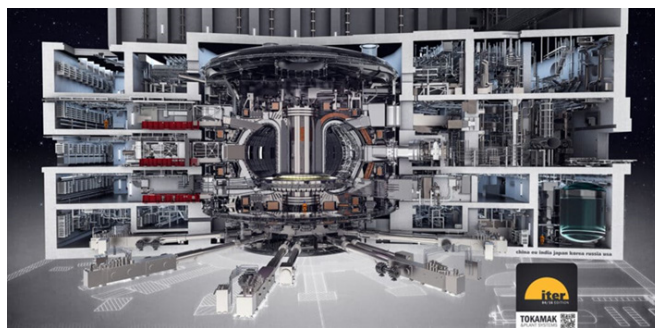
Rys. 11. ITER – widok z lotu ptaka [4]

Fig. 11. ITER – bird's eye view [4]



Rys. 12. Uproszczony schemat działania elektrowni ITER [4]

Fig. 12. Simplified diagram of the ITER power plant operation [4]



Rys. 13. Widok wnętrza reaktora ITER [4]

Fig. 13. Interior view of the ITER reactor [4]

Ciepło będzie przekazywane przez pętlę chłodzenia wodnego do wymiennika ciepła w celu wytworzenia pary.

Para będzie napędzać turbiny elektryczne produkujące energię elektryczną.

Para wodna zostanie skroplona i zamieniona w wodę, co pozwoli na pochłonięcie większej ilości ciepła z reaktora w wymienniku ciepła.

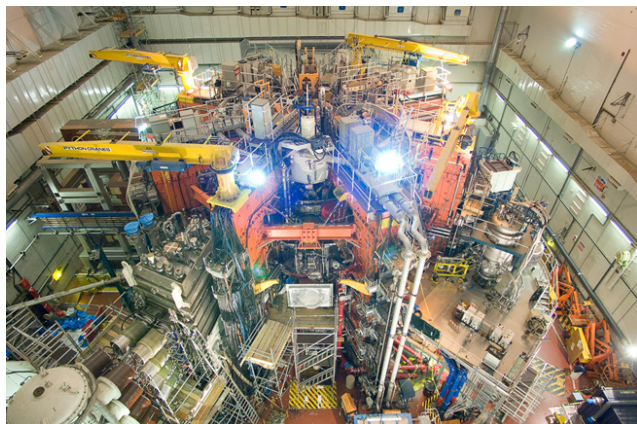
Tokamak ITER początkowo będzie służył do testowania wykonalności reaktora termojądrowego, a ostatecznie stanie się testową elektrownią termojądrową.

2. JET

JET (Joint European Torus) w Wielkiej Brytanii to największy działający tokamak, na którym w lutym 2022 r. osiągnięto rekordową energię 59 megadżuli z fuzji w ciągu 5 sekund.

Tokamak JET to eksperymentalny reaktor termojądrowy w kształcie torusa, położony w Culham Center for Fusion Energy w Oxfordshire w Wielkiej Brytanii. Obiekt wykorzystuje pola magnetyczne utrzymujące gorący, zjonizowany gaz (plazmę) z dala od wewnętrznej ściany zbiornika, umożliwiając bezpieczną pracę w temperaturze 150 milionów stopni dziesięciokrotnie wyższej niż temperatura w jądrze słońca.

Rdzeniem reaktora jest komora próżniowa, w której plazma termojądrowa jest utrzymywana za pomocą silnych pól magnetycznych. W obecnej konfiguracji główny i mniejszy promień torusa plazmowego wynoszą odpowiednio 3 i 0,9 metra, a całkowita objętość plazmy wynosi 90 metrów sześciennych. Divertor zlokalizowany na dnie komory próżniowej umożliwia kontrolowane odprowadzanie uciekającego ciepła i gazu.



Rys. 14. Widok hali z tokamakiem JET [3]

Fig. 14. View of the hall with the JET tokamak [3]

3. NIF

NIF (National Ignition Facility) w USA. Jet to placówka badawcza wykorzystująca inercyjne uwięzienie, gdzie po raz pierwszy udało się osiągnąć naukowy próg zapłonu (więcej energii z fuzji niż dostarczono do paliwa).

4. EAST

EAST w Chinach i KSTAR w Korei Południowej to tokamaki, które ustanowiły rekordy w długości trwania stabilnej plazmy.

5. CFS

CFS (Commonwealth Fusion Systems) to firma, która ogłosiła plany budowy niedaleko Richmond w stanie Wirginia pierwszej na świecie elektrowni fuzyjnej na skalę sieciową. CFS wybrało teren w hrabstwie Chesterfield w Wirginii jako miejsce budowy elektrowni typu ARC (skrót od Affordable, Robust, Compact – przystępny cenowo, wytrzymały, kompaktowy). Celem tej elektrowni fuzyjnej jest wytwarzanie, do wczesnych lat 30. XXI wieku 400 megawatów czystej, praktycznie nieograniczonej energii.

Reaktor o nazwie SPARC będzie wykorzystywał zupełnie nowy system wysokotemperaturowych magnesów nadprzewodzących zaprojektowanych przez CFS, aby utrzymać supergorącą plazmę w temperaturze ponad 100 milionów °C. Ma to być reaktor typu tokamak.

6. WEST and EAST

Zespoły badawcze z Chin i Francji osiągnęły rekordowe czasy stabilnych stanów plazmy w stanowiskach fuzyjnych. Reaktor EAST (Experimental Advanced Superconducting Tokamak – eksperymentalny nadprzewodzący tokamak) opracowany przez Instytut Fizyki Plazmy Chińskiej Akademii Nauk, w styczniu 2025 r. utrzymał stałą pracę plazmy o wysokim ograniczeniu przez 1066 sekund.

W ramach projektu „Wolfram Environment in Stead-state Tokamak”, (stanowisko WEST, projekt francuski) uzyskano czas stałej pracy plazmy wynoszący 1337 sekund pobijając chiński rekord sprzed kilku tygodni. Utrzymanie plazmy, która z natury jest niestabilna, jest jednym z największych problemów w fuzji jądrowej.

WEST jest wyjątkowy wśród europejskich tokamaków dzięki nadprzewodzącym magnesom, które umożliwiają długie czasy utrzymywania. Ten doskonały wynik pozwoli określić kierunki rozwojowe dla przyszłego wykorzysta-



Rys. 15. Wizualizacja proponowanego eksperymentu z tokamakiem SPARC [14]

Fig. 15. Visualization of the proposed SPARC tokamak experiment [14]

nia ITER w którym w przyszłej dekadzie ma być sprawdzona możliwość wielkoskalowej produkcji energii z fuzji jądrowej.

Literatura

- [1] Komisja Europejska, Dyrekcja Generalna ds. Badań Naukowych. (2007). Badania nad syntezą jądrową: Opcja energetyczna dla przyszłości Europy. Raport instytucjonalny UE, ISBN 9279005138.
- [2] Cook, I., Marbach, G., Di Pace, L., Girard, C., & Taylor, N. P. (2001, kwiecień). Bezpieczeństwo i wpływ fuzji na środowisko (Raport EUR (01) CCE-FU / FTC 8/5).
- [3] National Ignition Facility. (b.r.). National Ignition Facility. Dostęp online: <https://lasers.llnl.gov> (brak daty dostępu).
- [4] Global Society. (b.r.). Nuclear fusion – a sustainable energy revolution: 2027 vision. Dostęp online: <https://www.globalsociety.earth/post/nuclear-fusion-a-sustainable-energy-revolution-2027-vision>
- [5] Fusion Energy Sciences (FES), Biuro Naukowe Departamentu Energii USA. (b.r.). Fusion Energy Sciences. Dostęp online:
- [6] Kramarek, W., & Sałaciński, T. (2013). Podstawowe zagadnienia bezpieczeństwa elektrowni jądrowej. Przegląd Techniczny, nr 24–25/2013, s. 20–30.
- [7] Kramarek, W. (2016, styczeń). Warunki bezpiecznej pracy elektrowni jądrowej. Mechanik. <https://doi.org/10.17814/mechanik.2016.2.16>
- [8] U.S. Nuclear Regulatory Commission. (b.r.). Reading Room. Dostęp online: <http://www.nrc.gov/reading>
- [9] European Nuclear Society. (b.r.). Pebble bed reactor. Dostęp online: <http://www.euronuclear.org/info/encyclopedia/p/pebble.htm>
- [10] Wikipedia. (b.r.). Industrial safety systems. Dostęp online: http://en.wikipedia.org/wiki/Industrial_safety_systems
- [11] World Nuclear Association. (b.r.). Nuclear power reactors. Dostęp online: <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-power-reactors>
- [12] Wikipedia. (b.r.). Wybuch jądrowy. Dostęp online: https://pl.wikipedia.org/wiki/Wybuch_j%C4%85drowy
- [13] Wikipedia. (b.r.). Broń jądrowa. Dostęp online: https://pl.wikipedia.org/wiki/Bro%C5%84_j%C4%85drowa
- [14] Wikipedia. (b.r.). SPARC (tokamak). Dostęp online: [https://en.wikipedia.org/wiki/SPARC_\(tokamak\)#/media/File:Sparc](https://en.wikipedia.org/wiki/SPARC_(tokamak)#/media/File:Sparc)
- [15] Wikipedia. (b.r.). Ładunek termojądrowy. Dostęp online: https://pl.wikipedia.org/wiki/%C5%81adunek_termoj%C4%85drowy