

Hel-3 jako przyszłe paliwo elektrowni fuzji termojądrowej

Rosnące zapotrzebowanie na energię elektryczną na świecie i gwałtowne zmiany klimatu będące konsekwencją ludzkiej działalności wymagają poszukiwania nowych, alternatywnych źródeł energii. Jednym z najbardziej obiecujących sposobów pozyskiwania dużych ilości bezemisyjnej energii jest kontrolowana fuzja jądrowa.

Fuzja jądrowa.....	1
Reaktory fuzyjne – czy da się zbudować gwiazdę na Ziemi?	2
JET i ITER	2
Hel-3.....	2
Skąd bierze się ^3He na Ziemi?	3
Dlaczego hel-3?.....	3
Trudności związane z wykorzystaniem helu-3.....	4
Hel-3 na księżycu	4
Nadzieje z wiązane z energią termojądrową i helem-3.....	5
Kiedy można więc oczekiwać elektrowni fuzji jądrowej?.....	5

Fuzja jądrowa

Jest to zjawisko polegające na złączeniu się dwóch lżejszych jąder atomowych w jedno cięższeⁱ. W jej wyniku mogą powstawać również wolne elektrony, neutrony, cząstki alfa i cząstki elementarne. Reakcji termojądrowej towarzyszy wyzwolenie ogromnej ilości energii w postaci promieniowania gamma i energii kinetycznej produktów reakcji. Ten zysk energetyczny wynika z deficytu masyⁱⁱ (masa dwóch jąder atomowych przed reakcją jest większa niż masa jądra będącego produktem reakcji, a reszta masy zamienia się w energię).

Reakcja fuzji termojądrowej jest mechanizmem odpowiedzialnym za działanie gwiazd. To dzięki niej gwiazdy wydzielają energię, m.in. w postaci światła i ciepłaⁱⁱⁱ.

Ponieważ jądra atomowe mają dodatnie ładunki i się wzajemnie odpychają, potrzebna jest olbrzymia prędkość jąder, by mogły one zbliżyć się do siebie na tyle, żeby siły oddziaływań jądrowych przewyciężyły odpychanie elektrostatyczne i mogła zajść reakcja termojądrowa. We wnętrzu Słońca temperatura wynosi około 15 000 000 stopni Celsjusza a ciśnienie 100 000 atmosfer^{iv}. Te warunki zapewniają rozpędzenie jąder wodoru wystarczająco, by mogły one syntezować w hel¹.

¹Na różnym etapie życia gwiazdy syntezowane są coraz cięższe pierwiastki (w zależności od masy gwiazdy proces ten może prowadzić maksymalnie do uzyskania jąder żelaza). Słońce będące żółtym karłem na ciągu głównym będzie jeszcze syntezować wodór w jądrze przez najbliższe 10 mld. lat. Następnie stanie się czerwonym

Reaktory fuzyjne – czy da się zbudować gwiazdę na Ziemi?

Na obecną chwilę nie da się wytworzyć na Ziemi ciśnienia choć zbliżonego do tego panującego we wnętrzu słońca, można jednak wytworzyć znacznie większą temperaturę^v. Pierwsze próby zbudowania reaktora, który, wykorzystując kontrolowaną fuzję jądrową miałby generować energię elektryczną nastąpiły w latach 50. XX w. w Instytucie Energii Atomowej w Moskwie, na podstawie koncepcji tokamaka opracowanej przez Andrieja Sacharowa i Igora Tamma^{vi}.

Tokamak (ros. “toroidalna komora z cewką magnetyczną”) to urządzenie do przeprowadzania kontrolowanej syntezy jądrowej. W jego centrum znajduje się komora próżniowa w kształcie torusa, wewnątrz której znajduje się paliwo wodorowe. Pod wpływem ogromnego ciśnienia i temperatury przechodzi ono w stan plazmy, której kształt jest modelowany poprzez potężne elektromagnesy. Poprzez sterowanie kształtem plazmy podgrzewa się ją do temperatury, w której może zachodzić fuzja, czyli 150-300 mln. stopni Celsjusza^{vii}. Tokamak nie jest jedyną koncepcją reaktora fuzyjnego, jednak jest ona najbardziej rozwinięta. Inne to np. reaktor typu Polywell^{viii} i Stellarator^{ix}.

JET i ITER

Aktualnie działające reaktory w dalszym ciągu wymagają większego nakładu energii do przeprowadzenia reakcji niż mogą wyprodukować, jednak każdego roku postępy w tej dziedzinie wzrastają. Największy na świecie działający eksperymentalny reaktor termojądrowy to JET (Joint European Torus) znajdujący się w Wielkiej Brytanii^x. Osiągnął on moc 16 MW (megawatów) udowadniając techniczną możliwość osiągnięcia syntezy jądrowej z wykorzystaniem deuteru i trytu (izotopów wodoru), uważanych obecnie za najwydajniejsze paliwo^{xi}. Badania prowadzone w JET są podstawą do budowy tokamaka ITER^{xii} będącego projektem 35 państw (Stanów Zjednoczonych, Chin, Unii Europejskiej, Indii, Japonii, Korei i Rosji), budowanego na południu Francji^{xiii}. ITER ma osiągać moc 500 MW przy wkładzie 50 MW, udowadniając, że reaktor termojądrowy może być podstawą elektrowni i opłacalnym źródłem energii^{xiv}.

Hel-3

Jest to lekki i stabilny izotop helu z dwoma protonami i jednym neutronem (w przeciwieństwie do niego najpowszechniej występujący Hel-4 ma dwa protony i dwa neutrony). ³He jest nietoksyczny, nieradioaktywny oraz bierny chemicznie^{xv}. Izotop ten występuje na Ziemi w bardzo małej ilości - na milion cząstek ⁴He przypada tylko 1,37 cząstki He³^{vi}. Ta rzadkość powoduje, że jest on bardzo drogi – podczas gdy amerykańskie zapasy helu-3 spadały od 2001, jego cena wzrosła do 2016 z 200\$ do 2000\$ za litr^{xvii}. Źródła nie są jednak zgodne co do ilości naturalnego helu-3 w ziemskiej atmosferze – przeprowadzone w 2022 roku badanie zespołu naukowców z Uniwersytetu Kalifornijskiego w San Diego kierowanego przez Benjaminą Birnera wskazuje, że ilość helu-3 w ziemskiej atmosferze może być nawet 10 razy większa^{xviii}.

olbrzymem i będzie syntezować wodór w powłoce otaczającej jądro. (źródło: Łukasz Lamża, “Wszechświat krok po kroku”, wyd. Copernicus Center Press, Kraków 2018)

Skąd bierze się ^3He na Ziemi?

Naturalnie występujący hel-3 pochodzi z wiatru słonecznego, jego rzadkość spowodowana jest silnym polem magnetycznym Ziemi, które ten wiatr zatrzymuje^{xix}. Większość przemysłowego ^3He powstaje jako efekt uboczny otrzymywania trytu do głowic jądrowych amerykańskiego programu zbrojeniowego^{xx}. Hel-3 wykorzystywany jest w przemyśle zbrojeniowym (detektory substancji radioaktywnych), medycynie (MRI – rezonans magnetyczny), nauce (detektory neutronów, badania z wykorzystaniem laserów, kriogenika, badania nad wykorzystaniem ^3He w reaktorach termojądrowych) i przemyśle (detektory neutronów)^{xxi}.

Dlaczego hel-3?

Obecnie eksperymentuje się z przeprowadzaniem fuzji z użyciem deuteru (paliwo D-D) lub mieszanki deuteru i trytu (paliwo D-T). Fuzja D-T jest jak na razie jedyną perspektywą przemysłowego pozyskiwania energii przy obecnym stanie techniki^{xxii}. Ma ona jednak zasadniczą wadę - generuje wysokoenergetyczne neutrony (n), zgodnie z poniższą reakcją:

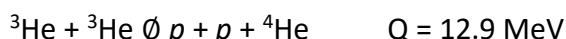


Neutrony te mogą powodować rozległe uszkodzenia w zbiorniku reaktora i wytwarzać długowieczne pierwiastki promieniotwórcze^{xxiii}. Dlatego przemysłowe wykorzystanie paliwa D-T wymagałoby stworzenia zaplecza do składowania odpadów radioaktywnych oraz dodatkowego zabezpieczenia reaktorów przed szkodami wyrządzanymi przez wysokoenergetyczne neutrony.

Alternatywą dla fuzji D-T jest fuzja z wykorzystaniem paliwa drugiej i trzeciej generacji^{xxiv} (paliwo D-D i D-T jest paliwem generacji pierwszej), czyli fuzja deuteru z helem-3 (reakcja D- ^3He):



oraz fuzja samego ^3He (reakcja $^3\text{He} - ^3\text{He}$):



Zaletą tych reakcji jest to, że zamiast wysokoenergetycznego neutronu powstaje jeden (reakcja D- ^3He) lub dwa (reakcja $^3\text{He} - ^3\text{He}$) wysokoenergetyczne protony (p). Mogą być one bezpośrednio przekonwertowane w energię elektryczną poprzez użycie elektrostatycznych konwertyatorów energii bezpośrednio (DEC – ang. Direct Energy Converter)^{xxv}, co niesie za sobą ogromne korzyści - ponieważ w przeciwieństwie do dodatnio naładowanych protonów neutrony nie mają ładunku elektrycznego, do produkcji energii elektrycznej wymagane są klasyczne turbiny parowe (takie jak te używane np. w elektrowniach jądrowych i węglowych) napędzane energią cieplną powstałą w wyniku reakcji^{xxvi}. Dzięki temu, że w wyniku powyżej

² MeV to skrót jednostki *megaelektronowolt* wykorzystywanej w fizyce cząstek i fizyce jądrowej. 1 MeV wynosi 1 000 000 elektronowoltów (eV). 1 eV to energia kinetyczna, jaką uzyskuje elektron po przebyciu w próżni drogi między 2 punktami, gdy różnica potencjałów między tymi punktami jest równa 1 V; $1 \text{ eV} \approx 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. (źródło - <https://encyklopedia.pwn.pl/haslo/elektronowolt;3897409.html>)

opisanych reakcji nie powstają wysokoenergetyczne neutrony³, użycie paliwa drugiej i trzeciej generacji nie niesie za sobą zagrożeń radiologicznych i nie wymaga tworzenia dodatkowej infrastruktury.

Trudności związane z wykorzystaniem helu-3

Chociaż wykorzystanie ^3He jako paliwa do reaktora fuzyjnego daje nadzieje na otrzymanie czystego i niezwykle wydajnego źródła energii, istnieją problemy, które muszą być rozwiązane by wykorzystać potencjał tego izotopu.

1. Problemy technologiczne

Na chwilę obecną po prostu nie dysponujemy reaktorem fuzyjnym mogącym przeprowadzić fuzję $\text{D}-^3\text{He}$ lub $^3\text{He} - ^3\text{He}$ na skalę niezbędną do produkcji energii. Najwyższą dotychczas (informacja z 08.02.2021) uzyskaną temperaturą plazmy w reaktorze termojądrowym osiągnięto w koreańskim "Sztucznym Słońcu" - temperaturę 100 mln. °C utrzymano przez 20 sekund^{xxvii}. Fuzja $\text{D}-^3\text{He}$ wymaga temperatury 200 mln. stopni Celsjusza^{xxviii}. Jednak firma Helion opracowuje reaktor zdolny do przeprowadzenia fuzji $\text{D}-^3\text{He}$ w temperaturze zaledwie 100 mln. stopni Celsjusza^{xxix}. Przyszłość fuzji jądrowej z wykorzystaniem helu-3 jest więc obiecująca.

2. Problemy z dostępnością ^3He

Nawet jeżeli hel-3 nie jest aż tak rzadki w środowisku naturalnym jak się tego spodziewano, ilość ta jest za mała by wykorzystywać ją do produkcji energii. Można jednak otrzymywać hel-3 sztucznie, jako produkt uboczny otrzymywania trytu. Zasoby helu-3 mogą się powiększać wraz z rozwojem reaktorów fuzji D-D w wyniku której powstaje tryt, który rozpada się następnie w hel-3^{xxx}. Dzięki temu, wykorzystywanie paliwa pierwszej generacji przybliżałoby używanie paliwa generacji drugiej i trzeciej.

Hel-3 na księżycu

W przeciwieństwie do Ziemi, Księżyc nie ma pola magnetycznego które zatrzymywałoby wiatr słoneczny^{xxxi}. Dzięki temu w księżycowym regolicie znajdują się bardzo duże ilości helu-3^{xxxii}. Największe światowe agencje kosmiczne i firmy prywatne rozważają wykopywanie helu-3 z Księżyca co w raz z wykorzystaniem technologii fuzji termojądrowej zapewniłoby ludzkości niemalże nieograniczone zasoby energetyczne: na księżycu jest 10 razy więcej energii zmagazynowanej w postaci ^3He niż we wszystkich paliwach kopalnych na Ziemi, z jednej tony ^3He można wyprodukować 10 000 MW energii elektrycznej (przy wydajności 70%), a 40 ton ^3He wystarczyłoby do zaspokojenia całkowitej konsumpcji energii USA w 2020r^{xxxiii}.

W jeszcze dalszej przyszłości rozważa się również pozyskiwanie ^3He z Jowisza, który jest jeszcze bardziej obfity w ten izotop^{xxxiv}.

³ Właściwie podczas reakcji $\text{D}-^3\text{He}$ w śladowej ilości zachodzi również reakcja D-D w wyniku której powstają neutrony. Reakcja ta odpowiada jednak jedynie za 1% całkowitej energii produkowanej w reaktorze (J.C. Crabb i in. 1993).

Nadzieje związane z energią termojądrową i helem-3

Przyszłość energii termojądrowej nie jest pewna i jej przemysłowe wykorzystanie wymaga rozwiązania wielu bardzo złożonych problemów. Jednak postępy w tej dziedzinie stale dają nadzieję, że ludzkość będzie w bliższej lub dalszej przyszłości cieszyć się ogromnymi zasobami przyjaznej środowisku energii. Choć w wyniku fuzji D-D i D-T powstają odpady radioaktywne ich ilość jest zdecydowanie mniejsza niż w przypadku elektrowni atomowych^{xxxv}. Nie ma również zagrożenia uszkodzeniem reaktora, które skutkowałoby skażeniem środowiska, ponieważ zachodząca w reaktorze reakcja nie jest reakcją łańcuchową (w przeciwieństwie do reakcji w reaktorze atomowym) i może być w każdej chwili przerwana^{xxxvi}. Choć pozyskiwanie helu-3 z księżyca stanowi ogromne wyzwanie załogowe misje księżycowe w najbliższych dekadach umożliwią stworzenie niezbędnego zaplecza górniczego. Fuzja $^3\text{He} - ^3\text{He}$ daje perspektywę całkowicie neutralnego dla środowiska (w wyniku reakcji powstaje jedynie hel-4, który jest bierny chemicznie) i niezwykle wydajnego źródła energii.

Kiedy można więc oczekiwać elektrowni fuzji jądrowej?

Następca reaktora ITER, reaktor DEMO ma rozpocząć demonstracyjną produkcję energii elektrycznej w latach 50. XXI wieku^{xxxvii}. Prywatna firma Helion przewiduje uruchomienie zasilania małej sieci elektrycznej za pomocą reaktora Polaris już w roku 2024^{xxxviii}. Być może obraz cywilizacji korzystający z "energii przyszłości" nie jest aż tak odległy.

ⁱ <https://encyklopedia.pwn.pl/haslo/reakcja-termojadowa;3966423.html>

ⁱⁱ <https://encyklopedia.pwn.pl/haslo/;3938457>

ⁱⁱⁱ <https://www.euro-fusion.org/fusion/fusion-on-the-sun/>

^{iv} Tomasz Rożek - "Kosmos", wyd. Wab, Warszawa 2016

^v <https://ccfe.ukaea.uk/research/joint-european-torus/>

^{vi} <https://encyklopedia.pwn.pl/haslo/tokamak;3987756.html>

^{vii} <https://www.iter.org/mach/Tokamak>

^{viii} Krall, Nicholas A. "The polywell™: A spherically convergent ion focus concept." *Fusion Technology* 22.1 (1992): 42-49.

^{ix} Spitzer Jr, Lyman. "The stellarator concept." *The Physics of Fluids* 1.4 (1958): 253-264.

^x <https://www.euro-fusion.org/devices/jet/>

^{xi} <https://www.gov.pl/web/polski-atom/fuzja-jadowa>

^{xii} <https://www.euro-fusion.org/devices/jet/research-at-jet/>

^{xiii} <https://fusionforenergy.europa.eu/iter/>

^{xiv} <https://www.iter.org/proj/inafewlines#2>

^{xv} Shea, Dana A., and Daniel L. Morgan. "The helium-3 shortage: Supply, demand, and options for congress." (2010).

^{xvi} O'Reilly, Bryan, and R. B. B. von Frese. *Lunar Exploration for He-3*. Diss. Ohio State University, 2017.

^{xvii} O'Reilly, Bryan, and R. B. B. von Frese. *Lunar Exploration for He-3*. Diss. Ohio State University, 2017.

^{xviii} <https://www.vice.com/en/article/7kbndq/scientists-discover-unexplained-abundance-of-rare-nuclear-fusion-fuel-on-earth>

^{xix} https://www.esa.int/Enabling_Support/Preparing_for_the_Future/Space_for_Earth/Energy/Helium-3_mining_on_the_lunar_surface

^{xx} Shea, Dana A., and Daniel L. Morgan. "The helium-3 shortage: Supply, demand, and options for congress." (2010).

^{xxi} Shea, Dana A., and Daniel L. Morgan. "The helium-3 shortage: Supply, demand, and options for congress." (2010).

^{xxii} <https://www.iter.org/of-interest/1084>

^{xxiii} Crabb, J. C., et al. "Fifty years of research in helium-3 fusion and helium-3 resources." (1993).

-
- ^{xxiv} Kulcinski, G. L. "The Significance of Helium-3 Fusion." (2001).
- ^{xxv} Crabb, J. C., et al. "Fifty years of research in helium-3 fusion and helium-3 resources." (1993).
- ^{xxvi} Simko, Thomas, and Matthew Gray. "Lunar helium-3 fuel for nuclear fusion: technology, economics, and resources." *World Future Review* 6.2 (2014): 158-171
- ^{xxvii} <https://www.national-geographic.pl/artukul/sztuczne-slonce-osiagnelo-rekordowo-wysoka-temperatura-klucz-do-energii-termojadrowej>
- ^{xxviii} <https://www.science.org/content/article/fusion-power-may-run-fuel-even-gets-started>
- ^{xxix} <https://www.helionenergy.com/our-technology/>
- ^{xxx} <https://www.helionenergy.com/faq/>
- ^{xxxi} https://www.esa.int/Enabling_Support/Preparing_for_the_Future/Space_for_Earth/Energy/Helium-3_mining_on_the_lunar_surface
- ^{xxxii} <https://solarsystem.nasa.gov/studies/191/lunar-helium-3-fusion-resource-distribution/>
- ^{xxxiii} Kulcinski, G. L. "The Significance of Helium-3 Fusion." (2001).
- ^{xxxiv} https://www.esa.int/Enabling_Support/Preparing_for_the_Future/Space_for_Earth/Energy/Helium-3_mining_on_the_lunar_surface
- ^{xxxv} Kulcinski, G. L. "The Significance of Helium-3 Fusion." (2001).
- ^{xxxvi} <https://www.helionenergy.com/faq/>
- ^{xxxvii} <https://www.euro-fusion.org/programme/demo/>
- ^{xxxviii} <https://www.helionenergy.com/faq/>