

Jak działa reaktor jądrowy i elektrownia jądrowa?

- Wprowadzenie
- Przeczytaj
- Symulacja interaktywna
- Sprawdź się
- Dla nauczyciela

Jak działa reaktor jądrowy i elektrownia jądrowa?

źródło: Idaho National Laboratory

Czy to nie ciekawe?



Źródło: dostępny w internecie: <https://pixabay.com/photos/energy-nuclear-power-plant-grohnde-4030427/> [dostęp 17.09.2022].

Wbrew powszechnym opiniom budowa i zasada działania elektrowni jądrowej nie odbiega znacznie od zasady działania rozpowszechnionych w Polsce elektrowni węglowych.

W największym uproszczeniu generowanie prądu elektrycznego w obydwu elektrowniach opiera się na trzech krokach:

1. Uwolnienie energii, czy to w procesie spalania węgla, czy rozszczepienia paliwa jądrowego;
2. Zamiana energii cieplnej na energię mechaniczną pary;
3. Zamiana energii mechanicznej pary na energię elektryczną z wykorzystaniem generatora prądu elektrycznego, którego działanie opiera się na zjawisku indukcji elektromagnetycznej.

Spośród wymienionych kroków jedynie pierwszy rozróżnia elektrownię konwencjonalną, czyli wykorzystującą węgiel kamienny, brunatny, gaz ziemny, czy biomasę, od elektrowni jądrowej. Jemu poświęcimy więc najwięcej uwagi.

Twoje cele

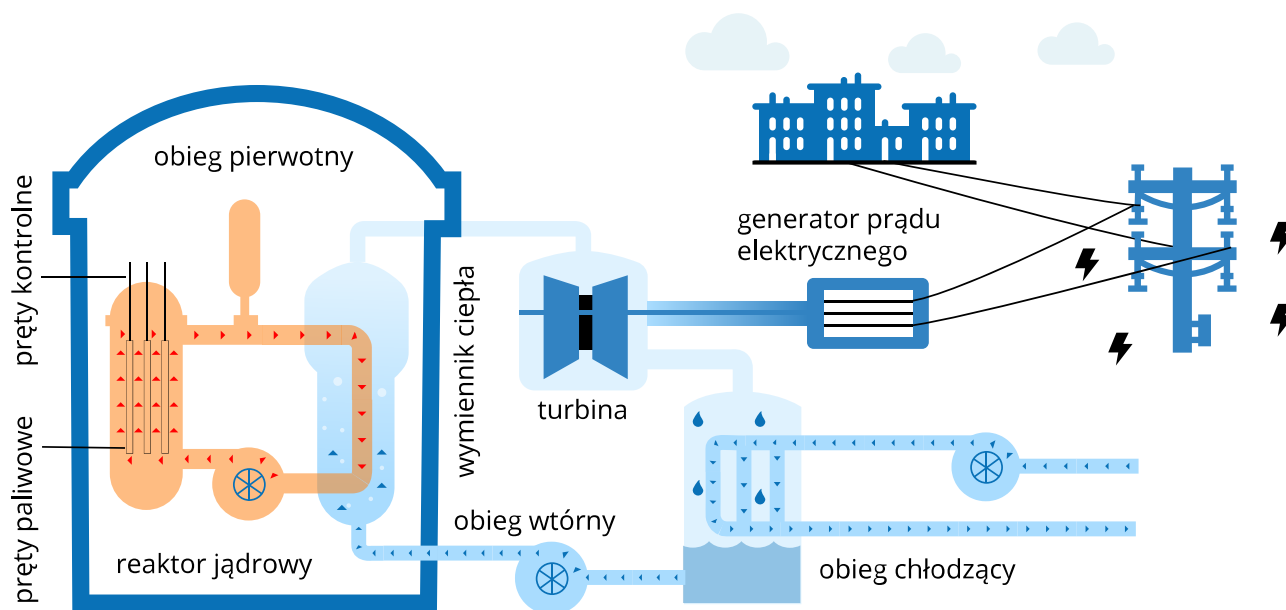
W tym e-materiale:

- dowiesz się, jak zbudowany jest oraz, jak działa reaktor jądrowy,
- zrozumiesz różnice w działaniu elektrowni konwencjonalnych i jądrowych,
- poznasz metodę sterowania mocą reaktora jądrowego,
- zastosujesz zdobytą wiedzę do rozwiązywania zadań.

Przeczytaj

Warto przeczytać

Realizacji elektrowni i [reaktorów jądrowych](#) jest wiele. W tym materiale skupimy się na najpopularniejszej, czyli na [reaktorze wodnym ciśnieniowym](#), w skrócie **PWR** (ang. *Pressurized Water Reactor*). Poniższa grafika pozwoli ci zrozumieć kolejne kroki prowadzące od reakcji [rozszczeplenia](#) do wygenerowania napięcia elektrycznego.



Rys. 1. Schemat elektrowni jądrowej z reaktorem typu PWR

Sercem każdej elektrowni jądrowej jest reaktor. To w nim zachodzi reakcja rozszczepienia paliwa jądrowego, prowadząca do uwolnienia ogromnej ilości energii. Paliwo jądrowe zawiera izotopy, które ulegają [rozszczepleni](#) pod wpływem pochłonięcia neutronu. Samo rozszczepienie jest procesem, w którym ciężkie jądro atomowe ulega podziałowi na dwa lżejsze fragmenty, czemu towarzyszy emisja neutronów oraz uwolnienie energii.

Wyemitowane neutrony mogą spowodować rozszczepienie kolejnych jąder, mówimy wtedy o reakcji łańcuchowej. Reaktory jądrowe są więc urządzeniami umożliwiającymi przeprowadzenie kontrolowanej reakcji łańcuchowej oraz zmianę uwolnionej energii na energię elektryczną.

Reaktor typu PWR można sobie wyobrazić jako ogromne, wypełnione wodą naczynie, w którym zanurzone są pręty zawierające paliwo jądrowe. Pręty zgrupowane są w kasetę paliwową. Ponadto każdy pręt zbudowany jest z mniejszych elementów - pastylek paliwowych. Poniższa ilustracja przedstawia fotografię kasety paliwowej oraz tworzących ją prętów i pastylek paliwowych. Paliwem jądrowym jest najczęściej związek zawierający izotop uranu ^{235}U . Występująca w przyrodzie ruda uranu ma jedynie ok 0,7% zawartości

^{235}U . To za mało, aby otrzymać samopodtrzymujący się cykl rozszczepień w reaktorach PWR. Stosowanym rozwiązaniem jest wzbogacanie uranu naturalnego w taki sposób, aby izotop ^{235}U stanowił ok. 3-5% próbki. Wzbogacony uran jest najpowszechniej stosowanym paliwem jądrowym.



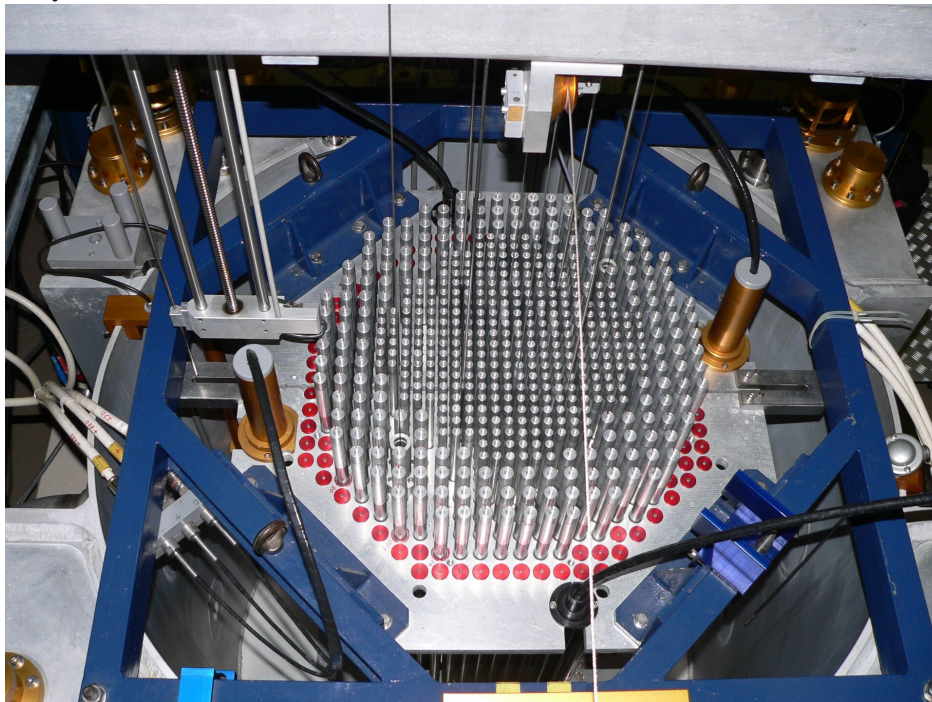
Rys. 2. Przykładowa kasetka paliwowa - elektrownia jądrowa w Leibstadt.

Oprócz prętów paliwowych w zbiorniku reaktora znajdują się **pręty kontrolne**, służące do kontrolowania reakcji rozszczepienia, sterowania mocą reaktora oraz jego szybkiego wyłączenia. Pręty zbudowane są z materiałów pochłaniających neutrony. Wsuniecie prętów kontrolnych pomiędzy pręty paliwowe powoduje, że wyemitowane w rozszczepieniu neutrony zostają pochłonięte i nie inicjują kolejnych aktów rozszczepień. Dzięki temu maleje energia wydzielana w reaktorze lub jest on całkowicie wyłączany. W przypadku awarii reaktora pręty samoczynnie opadają wygaszając reakcję łańcuchową. Jest to jeden z elementów systemu bezpieczeństwa elektrowni jądrowej.

Wypełniająca reaktor woda pełni dwie ważne funkcje. Pierwsza z nich jest związana z energiami neutronów. Neutrony wyemitowane w rozszczepieniu mają duże energie kinetyczne, sięgające nawet kilku megaelektronowoltów. Tak rozpędzone neutrony nie mogą zostać pochłonięte przez jądra uranu ^{235}U i zainicjować kolejnych aktów rozszczepień. Aby podtrzymać reakcję łańcuchową, neutrony muszą wytracić większość swojej energii kinetycznej. Odbywa się to w szeregu zderzeń sprężystych z atomami otaczającego materiału. Aby efektywnie zmniejszać energię neutronów (spowalniać je) wykorzystuje się materiały zbudowane z lekkich atomów, tzw. **moderatory**. W praktyce najczęściej stosuje się wodę (H_2O) lub ciężką wodę (D_2O). W reaktorach PWR rolę moderatora pełni wypełniająca je woda.

Drugą niezmiernie ważną funkcją wody jest odprowadzanie ciepła wygenerowanego w reaktorze. Energię uwolnioną w rozszczepieniu w ok. 85% stanowi energia kinetyczna

fragmentów rozszczepienia. Pozostałe 15% stanowi energia kinetyczna neutronów, cząstek beta oraz promieniowania gamma. Fragmenty rozszczepienia poruszając się w obrębie pręta paliwowego, tracą swoją energię kinetyczną prowadząc do rozgrzania pręta. Podobnie energia neutronów, cząstek beta i gamma w większości zostaje zamieniona na ciepło w obrębie materiałów reaktora. Znajdująca się w reaktorze woda przepływa wokół prętów paliwowych odbierając od nich ciepło. Następnie rozgrzana ciecz przepływa przez wymiennik ciepła, gdzie oddaje swoją energię wodzie, znajdującej się w drugim obiegu. Woda z reaktora krąży w zamkniętym obiegu (obiegu pierwotnym), dlatego po schłodzeniu wraca do zbiornika reaktora, by ponownie pełnić swoją rolę. Zauważ, że woda przepływająca przez reaktor nigdy nie wydostaje się poza budynek reaktora. Jest to jedno z wielu zabezpieczeń mających na celu uniemożliwienie wydostania się izotopów promieniotwórczych do środowiska.



Rys. 3. Reaktor jądrowy widziany od góry.

Wiesz już, jak działa reaktor jądrowy, jak jest zbudowany oraz co się dzieje z energią uwalnianą w rozszczepieniu. Prześledźmy teraz mechanizm zamiany energii cieplnej przekazanej wodzie obiegu wtórnego na energię elektryczną. Wymiennik ciepły, w którym następuje wymiana energii między obiegami, pełni rolę wytwornicy pary. Oznacza to, że woda z obiegu wtórnego po rozgrzaniu jest w postaci sprężonej pary wodnej. Posiadająca bardzo duże ciśnienie para rozpręża się na turbinach **generatora prądu elektrycznego (prądnic)**, napędzając je. Generator prądu jest zaś urządzeniem zmieniającym energię mechaniczną turbiny na energię elektryczną. Ten mechanizm jest wspólny dla elektrowni jądrowych i konwencjonalnych, a nawet dla dynamo zasilającego lampkę rowerową.

Po rozpędzeniu turbiny para obiegu wtórnego ulega skropleniu, a wydzielone ciepło jest odbierane przez wodę znajdującą się w obiegu trzecim, chłodzącym. Woda obiegu wtórnego również krąży w ciągu zamkniętym i nie wydostaje się do środowiska. Dopiero

trzeci, ostatni obieg wody jest otwarty. Rozgrzana woda jest odprowadzana albo do zbiornika znajdującego się w pobliżu elektrowni (np. jeziora), albo schładzana w chłodni kominowej, czyli szerokich okrągłych kominach, bardzo charakterystycznych dla elektrowni jądrowych.

Elektrownie jądrowe posiadają szereg zabezpieczeń uniemożliwiających uwolnienie substancji promieniotwórczych do środowiska. Zakłada się, że pojedyncze zabezpieczenia mogą zawieść, dlatego stosuje się szereg barier dublujących swoje zadanie. Pierwszą barierą jest materiał otaczający paliwo jądrowe, kolejną zbiornik reaktora, następnie obudowa bezpieczeństwa reaktora aż po sam budynek. Zarówno woda obiegu pierwotnego, przepływającego przez reaktor, jak i obiegu wtórnego, napędzającego turbiny generatora, krąży w cyklu zamkniętym i nie styka się ze środowiskiem. Ponadto wykorzystuje się systemy pasywne, czyli takie, których działanie nie wymaga zasilania. Przykładem są wpuszczane od góry pręty kontrolne. W razie awarii pręty grawitacyjnie opadają zatrzymując reakcję rozszczepienia.

Słowniczek

Rozszczepienie

(ang. *fission*) – przemiana jądrowa polegająca na rozpadzie jądra atomowego na dwa lżejsze fragmenty o zbliżonej masie, czemu towarzyszy emisja neutronów oraz uwolnienie energii. Rozszczepienie może zachodzić samoistnie (spontaniczne rozszczepienie) lub pod wpływem działania czynnika zewnętrznego, np. pochłonięcia neutronu lub protonu (rozszczepienie wymuszone).

Moderator neutronów

(ang. *neutron moderator*) – materiał służący do zmniejszania energii kinetycznej neutronów emitowanych w rozszczepieniu (spowalniania neutronów), w celu zwiększenia wydajności indukowania przez nie kolejnych aktów rozszczepienia. Najczęściej stosowanymi moderatorami są woda lub ciężka woda.

Reaktor jądrowy

(ang.: *nuclear reactor*) – urządzenie służące do przeprowadzania kontrolowanej reakcji łańcuchowej rozszczepienia oraz pozyskania uwolnionej w tym procesie energii.

Reaktor wodny ciśnieniowy PWR

(ang. *Pressurized Water Reactor*) – reaktor, w którym moderatorem oraz chłodziwem jest woda. Elektrownia z reaktorem PWR posiada trzy niestykające się obiegi wody, co zmniejsza ryzyko wycieku materiałów radioaktywnych.

Generator prądu elektrycznego/prądnica

(ang.: *electric generator*) – urządzenie służące do zmiany energii mechanicznej w energię elektryczną. Zasada działania generatora opiera się na prawie Faradaya, które

mówi, że w zamkniętym obwodzie, znajdującym się w polu magnetycznym generuje się siła elektromotoryczna indukcji równa szybkości zmiany strumienia indukcji pola magnetycznego przechodzącego przez ramkę. Oznacza to, że jeśli umieścimy zbudowaną z przewodnika ramkę w jednorodnym polu magnetycznym i zaczniemy nią obracać, tak aby zmieniał się przechodzący przez nią strumień indukcji magnetycznej, to w ramce wygeneruje się napięcie elektryczne. Tym sposobem energia mechaniczna obrotu ramki zamienia się na energię elektryczną.

Pręty kontrolne

(ang.: *control rods*) – zbudowane z materiału łatwo pochłaniającego neutrony, elementy rdzenia reaktora służące do kontroli szybkości zachodzenia reakcji łańcuchowej rozszczepienia oraz, w razie potrzeby, wygaszenia reakcji łańcuchowej.

Współczynnik powielania neutronów k

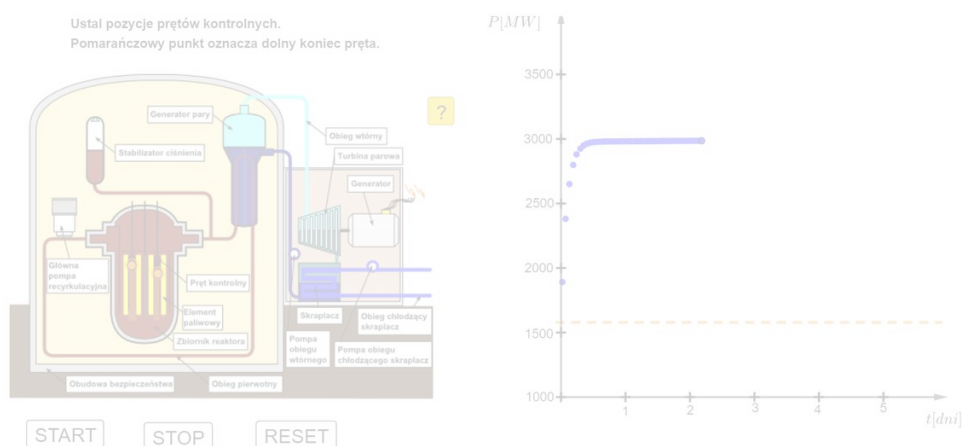
(ang.: *effective neutron multiplication factor*) – stosunek liczby neutronów w $i+1$ pokoleniu rozszczepienia do liczby neutronów w i -tym pokoleniu rozszczepienia. Inaczej mówiąc jest to średnia liczba neutronów z rozszczepienia, która zainicjuje kolejny akt rozszczepienia. Warunkiem podtrzymania reakcji łańcuchowej jest, aby współczynnik powielania wynosił przynajmniej 1.

Symulacja interaktywna

Jak działa reaktor jądrowy?

Symulacja ilustruje metodę sterowania reaktorem jądrowym. Zmieniając położenie prętów kontrolnych możesz sterować mocą reaktora. Wsuwanie prętów kontrolnych pomiędzy pręty paliwowe powoduje zmniejszanie liczby rozszczepień aż do całkowitego wygaszenia reakcji. Wynikiem symulacji jest moc wydzielana w reaktorze.

Zapoznaj się z symulacją i wykonaj polecenia.



Zasób interaktywny dostępny pod adresem <https://zpe.gov.pl/a/DRbIYhk1i>

Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0. Licencja:
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl>.

Polecenie 1

Zmieniaj położenia prętów kontrolnych, opuszczając je i podnosząc. Jak zmiana położenia prętów wpływa na moc wydzielaną w reaktorze?




Polecenie 2

A to już trudniejsze polecenie - na poziomie zaawansowanym.

Przyjrzyj się wykresom mocy w funkcji czasu, które pojawiają się na ekranie po opuszczeniu lub podniesieniu prętów kontrolnych.

1. Podaj nazwę funkcji matematycznej, która je opisuje.
2. Wskaż przykład innego zjawiska, w którym zmiany wielkości fizycznej w czasie mają podobny charakter.

Sprawdź się

Pokaż ćwiczenia:   

Ćwiczenie 1



Ćwiczenie 2



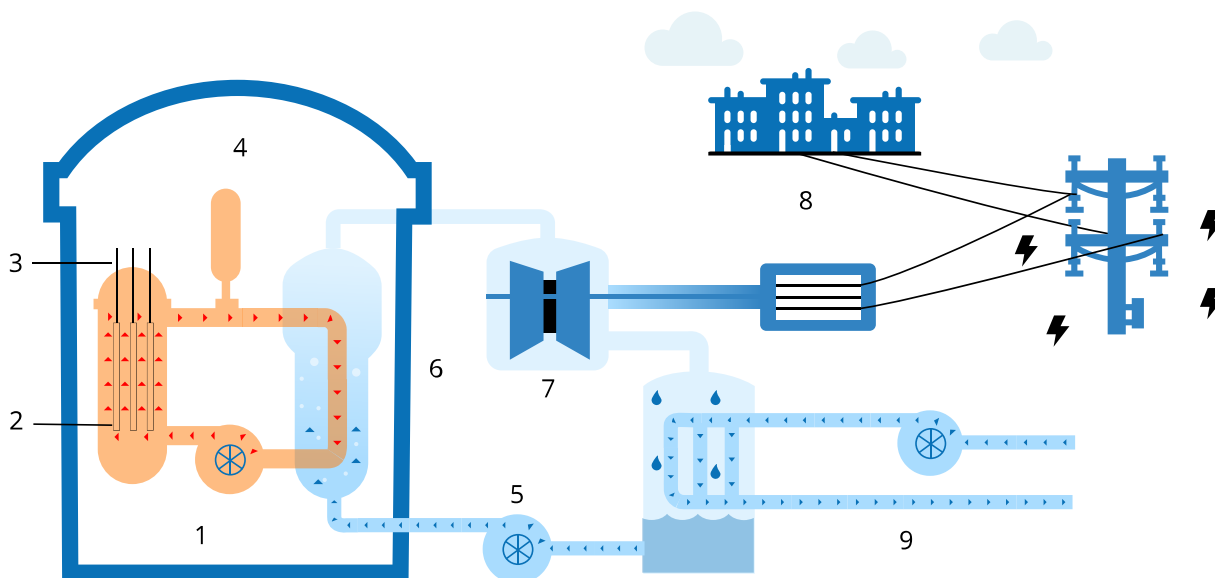
Ćwiczenie 3



Ćwiczenie 4



Ćwiczenie 5



Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0. Licencja:
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl>.

Ćwiczenie 6



Ćwiczenie 7





Dla nauczyciela

Imię i nazwisko autora:	Aleksandra Fijałkowska
Przedmiot:	Fizyka
Temat zajęć:	Działanie reaktora jądrowego oraz elektrowni jądrowej
Grupa docelowa:	III etap edukacyjny, liceum, technikum, zakres podstawowy i rozszerzony
Podstawa programowa:	<p>Cele kształcenia – wymagania ogólne</p> <p>I. Wykorzystanie pojęć i wielkości fizycznych do opisu zjawisk oraz wskazywanie ich przykładów w otaczającej rzeczywistości.</p> <p>Zakres podstawowy</p> <p>Treści nauczania – wymagania szczegółowe</p> <p>I. Wymagania przekrojowe. Uczeń:</p> <p>15) wyodrębnia zjawisko z kontekstu, nazywa je oraz wskazuje czynniki istotne i nieistotne dla jego przebiegu.</p> <p>XI. Fizyka jądrowa. Uczeń:</p> <p>10) opisuje zasadę działania elektrowni jądrowej oraz wymienia korzyści i niebezpieczeństwa płynące z energetyki jądrowej.</p> <p>Zakres rozszerzony</p> <p>Treści nauczania – wymagania szczegółowe</p> <p>I. Wymagania przekrojowe. Uczeń:</p> <p>19) wyodrębnia zjawisko z kontekstu, nazywa je oraz wskazuje czynniki istotne i nieistotne dla jego przebiegu.</p> <p>XII. Elementy fizyki relatywistycznej i fizyka jądrowa. Uczeń:</p> <p>16) opisuje zasadę działania elektrowni jądrowej oraz wymienia korzyści i niebezpieczeństwa płynące z energetyki jądrowej.</p>

Kształowane kompetencje kluczowe:	Zalecenia Parlamentu Europejskiego i Rady UE z 2018 r.: <ul style="list-style-type: none"> • kompetencje w zakresie rozumienia i tworzenia informacji, • kompetencje matematyczne oraz kompetencje w zakresie nauk przyrodniczych, technologii i inżynierii, • kompetencje cyfrowe, • kompetencje osobiste, społeczne i w zakresie umiejętności uczenia się.
Cele operacyjne:	<p>Uczeń:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. omówi, jak jest zbudowany i jak działa reaktor jądrowy; 2. wyjaśni różnice w działaniu elektrowni konwencjonalnych i jądrowych; 3. przedstawi metodę sterowania mocą reaktora jądrowego, 4. zastosuje zdobytą wiedzę do rozwiązywania zadań.
Strategie nauczania:	IBSE
Metody nauczania:	wykład informacyjny
Formy zajęć:	praca zespołowa
Środki dydaktyczne:	tablety do dyspozycji uczniów
Materiały pomocnicze:	brak
PRZEBIEG LEKCJI	
Faza wprowadzająca:	
<p>Nauczyciel wprowadza zagadnienie elektrowni jądrowej wypytyując uczniów o skojarzenia, które mają z elektrowniami jądrowymi. Wypytuje, czy zdaniem uczniów elektrownie jądrowe bardzo różnią się od elektrowni konwencjonalnych, co je rozróżnia, a co jest podobne.</p>	
Faza realizacyjna:	
<p>Nauczyciel opisuje zasadę działania elektrowni jądrowej wspomagając się rysunkiem zamieszczonym w materiale.</p> <p>Uczniowie korzystają z materiału interaktywnego sprawdzają działanie prętów sterujących oraz sposób sterowania elektrownią jądrową.</p> <p>Uczniowie sprawdzają zdobytą wiedzę rozwiązując zadania 2, 3 i 4 z zestawu ćwiczeń.</p> <p>Nauczyciel ocenia pracę uczniów, dając im informację zwrotną odnośnie ich wiedzy.</p>	
Faza podsumowująca:	

Uczniowie dyskutują, które ich zdaniem elementy elektrowni jądrowej występują również w elektrowni konwencjonalnej, odpowiadając na pytania postawione w części wprowadzającej.

Poprzez analizę wypowiedzi uczniów nauczyciel określa w jakim stopniu osiągnięte zostały wyznaczone cele.

Praca domowa:

W celu powtórzenia wiadomości o działaniu elektrowni jądrowej uczniowie rozwiązują zadanie 7 z zestawu ćwiczeń.

**Wskazówki
metodyczne opisujące
różne zastosowania
danego multimedium**

Multimedium może być wykorzystane przez uczniów po lekcji jako praca domowa.