



STATKI OKRĘTY Z NAPĘDEM JĄDROWYM ORAZ PŁYWAJĄCE ELEKTROWNIE JĄDROWE

SEMINARIUM SEKCJI AUTOMATYKI I POMIARÓW OW SEP
WIELCY/WYBITNI ELEKTRYCY POLSCY

DR INŻ. KRZYSZTOF RZYMKOWSKI

STOWARZYSZENIE EKOLOGÓW NA RZECZ ENERGII NUKLEARNEJ

SEREN

WARSZAWA 00-01-8080

Wprowadzenie

Wykorzystanie energii jądrowej na morzu

Napęd Jądrowy

Okrętów i statków podwodnych

Historia

Napęd okrętów podwodnych

Okrętów i statków nawodnych

Okręty wojenne

Statki (frachtowce, lodołamacze, jednostki doświadczalne)

Demontaż i unieszkodliwianie elementów radioaktywnych

Perspektywy napędu jądrowego

Transport morski materiałów jądrowych

Pływające elektrownie jądrowe

Zmiany klimatyczne wymuszają ograniczenie wykorzystania paliw kopalnych.

Zaletą napędu jądrowego jest małe zużycie paliwa (1kg U odpowiada 70 t węgla).

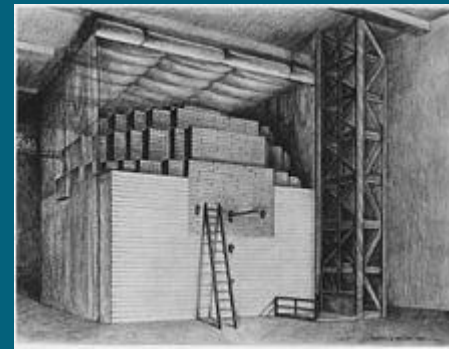
Okrety z napędem jądrowym

Historia

Leo Szilard, Otto Hahn, Firtz Strassman (1938)

Pierwszym na świecie reaktorem jądrowym uruchomionym w 1942 roku przez zespół pod kierownictwem Enrico Fermiego był tzw. *stos chicagowski CP -1* (*Chicago Pile*) powstały na potrzeby *Projektu Manhattan* - budowa bomby. Drugi stos atomowy uruchomiono w 1944 i był przeznaczony do produkcji plutonu również na potrzeby *Projektu Manhattan*.

Pojawienie nowego sposobu pozyskiwania energii przyspieszyło prace badawcze nad jego wykorzystaniem do celów militarnych.



Po wejściu okrętów podwodnych do służby, w czasie pierwszej wojny światowej stały się one kluczowym orężem wojny morskiej i podstawowym środkiem zwalczania celów morskich przeciwnika.

Marynarka wojenna od dawna poszukiwała specjalnego napędu dla okrętów podwodnych zwiększającego ich zasięg i czas przebywania pod wodą.

Fizyk Ross Gunn z laboratorium badawczego Marynarki Wojennej Stanów Zjednoczonych (*Naval Research Laboratory - NRL*) zaproponował wykorzystanie energii jądrowej do napędu okrętów łodzi podwodnych.



Okrety z napędem jądrowym

Historia

Wstępne badania rozpoczęto już w 1940 roku przygotowując się do pozyskania odpowiedniego materiału jądrowego. W następnych latach naukowcy marynarki wojennej opracowali metody: separacji izotopów uranu za pomocą dyfuzji termicznej cieczy oraz produkcji fluorku uranu (UF_6). Obie te metody były niezbędne do produkcji uranu U^{235} i zostały wykorzystane do budowy bomby atomowej.

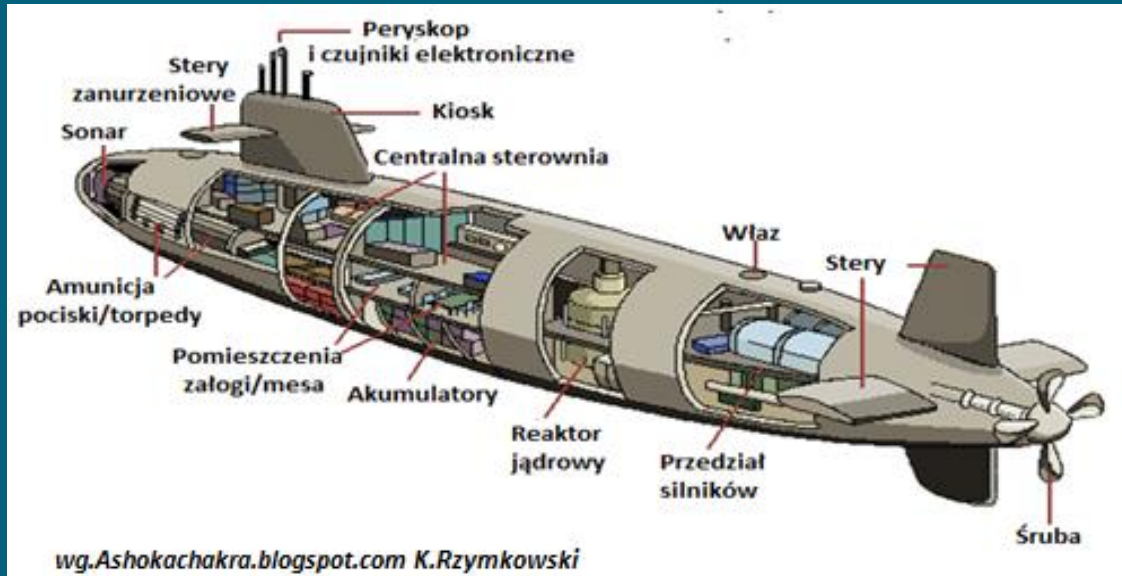
W 1946 roku Marynarka Wojenna rozpoczęła starania o uzyskanie środków na kontynuację programu budowy napędu jądrowego dla okrętów podwodnych (*Naval Nuclear Propulsion Programme – NNPP*), który przyjęto w 1948 roku i rozpoczęto prace badawcze na zlecenie Komisji Energii Atomowej (*Atomic Energy Commission – AEC*). Były one prowadzone pod kierownictwem dwóch koncernów Westinghouse Electric Corporation i General Electric Company opracowujących niezależne koncepcje rozwiązań reaktorów jądrowych i sposobu realizacji napędu.

Problemem był: wybór moderatora neutronów i związanego z nim chłodzenia rdzenia, wzbogacenie uranu, konstrukcja bloków paliwowych, sposób wymiany paliwa i wymagania dotyczące bezpieczeństwa, wybór chłodziwa, wyciszenie itd. Brano pod uwagę trzy rodzaje chłodziwa: wodę, gaz i ciekły metal. Szybko zrezygnowano z gazu (helu). Powstały dwa projekty reaktor wodno ciśnieniowy (*Pressurized Water Reactor – PWR*) (Westinghouse) typ MK 1 i reaktor chłodzony ciekłym sodem (General Electric) typ MK A. Ostateczny wybór rodzaju reaktora miał nastąpić po sprawdzeniu prototypów w warunkach

Okrety z napędem jądrowym

Historia

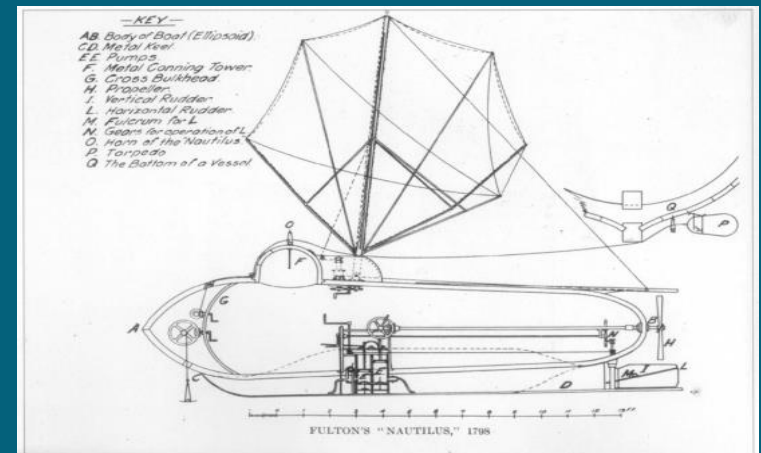
Pierwszy doświadczalny reaktor przeznaczony do napędu okrętów powstał w Stanach Zjednoczonych w 1953 roku, a w 1955 zwodowano pierwszy atomowy okręt podwodny *Nautilus*.



- 1954 – 1980
- Reaktor S2W o mocy 11 MW
- Prędkość 22w
- 1958 przepłynął pod lodem biegun północny
- Reaktor dla reaktorów energetycznych.

Chłodzenie za pomocą ciekłego sodu zastosowano na okręcie podwodnym typu **Seawolf**.

Pierwszy Nautilus powstał we Francji w 1801 r. wg projektu Roberta Fultona na zamówienie Pierwszego Konsula Napoleona Bonaparte



Okrety z napędem jądrowym

Historia

Napęd jądrowy spowodował rewolucję techniczną i rewolucję w taktycznym w prowadzeniu działań wojennych.

Rewolucja techniczna spowodowała zmiany w konstrukcji okrętów podwodnych.

Rewolucją w działaniach wojennych było całkowite wyeliminowanie konieczności częstego wynurzania w celu ładowania baterii pozwalających na działania w zanurzeniu, niewyobrażalne zwiększenie zasięgu i czasu przebywania w zanurzeniu, zwiększenie szybkości pod wodą i w wynurzeniu do 30 – 40 węzłów.

Przykładem atrakcyjności wprowadzonych zmian może być podwodne opłynięcie świata trasą „wyznaczoną” przez Magellana przez USS Triton w ciągu 60 dni i 83 dniach zanurzenia.



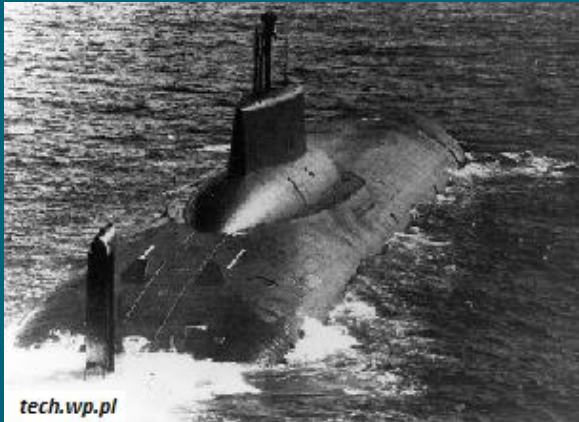
Okręty podwodne, w zanurzeniu około 500 m są niewidoczne dla radarów samolotowych i satelitarnych systemów obserwacyjnych.

Okrety z napędem jądrowym

Historia

Wbudowanie reaktorów na okrętach podwodnych pozwoliło:

- zaoszczędzić dużo miejsca poprawiając **warunki życiowe załogi**. Na największym rosyjskim okręcie podwodnym **Akuła** (o długości 175 m prawie dwukrotnie dłuższym od **Nautilusa**) były baseny i sauna, sale kinowe.



- umożliwiło zmagazynowanie nowego uzbrojenia głównie raketowego
- budowę na osłon bezpieczeństwa załogi żyjącej i nocującej przez ścianę z reaktorem jądrowym i głowicami.

Ochrona przed promieniowaniem wykonana jest najczęściej w postaci płaszcza z ołowiu lub betonu otaczającego ze wszystkich stron reaktor. Oprócz tego stosowane są specjalnie opracowane materiały z tworzyw sztucznych (polietylen) i dodatkowo rozmieszcza się wokół reaktora zbiorniki z paliwem do silnika pomocniczego. Wokół rdzenia wewnątrz reaktora wbudowana jest osłona, która ma chronić stalową obudowę przed bombardowaniem neutronami powodującymi jej degradację.

Napęd jądrowy w okręcie podwodnym

W siłowni okrętów z napędem jądrowym używa się turbiny parowe.

Wprowadzenie zabezpieczeń przed promieniowaniem powoduje, że siłownia jest ciężka, co ma wpływ na konstrukcję kadłuba. Siłownię umieszcza się blisko rufy by skrócić długość wałów napędowych. Zintegrowane urządzenia siłowni są ustawiane w osi pionowej ze względu na ograniczenia dostępnej przestrzeni. Szerokość (średnica) kadłuba wynosi około 10 m.

Wpływ na rozmiary siłowni ma konstrukcja reaktora. Sam reaktor jest najczęściej walcem o średnicy około 1 m i wysokości 1,5 m. ale wszystkie ważne elementy (sterowanie prętami sterującymi i regulacyjnymi, wytwornice pary, stabilizator ciśnienia,) są umieszczane nad nim. Najczęściej używanym typem reaktora jądrowego okrętowego jest reaktor wodny ciśnieniowy PWR. Paliwem jądrowym jest wzbogacony uran U^{235} (wzbogacenie - stosunek łącznej masy izotopów U^{233} i U^{235} do całkowitej masy uranu).



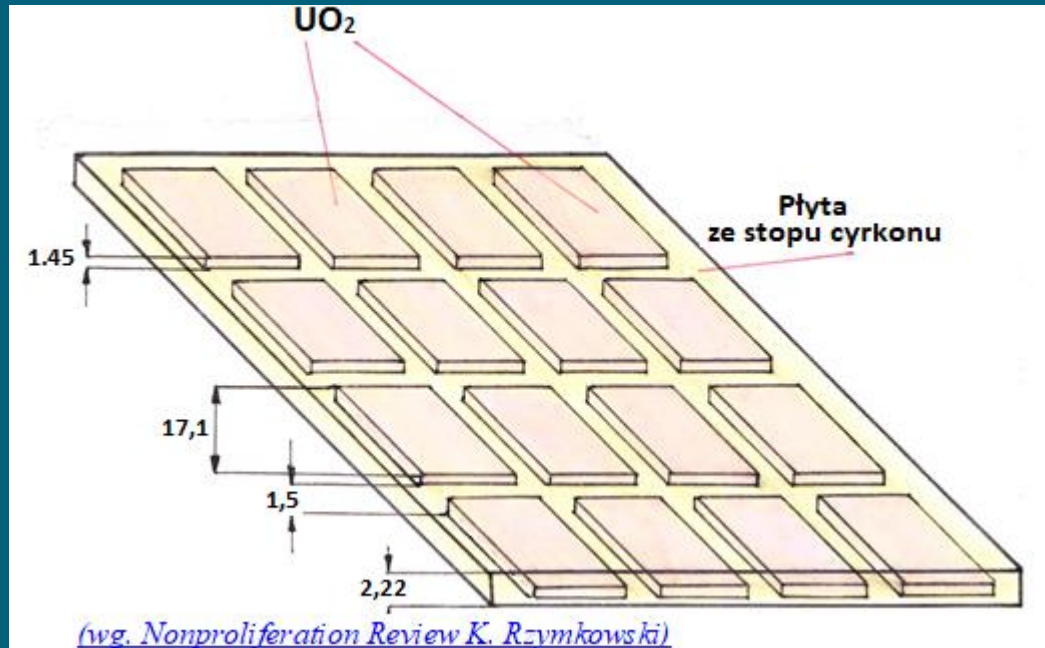
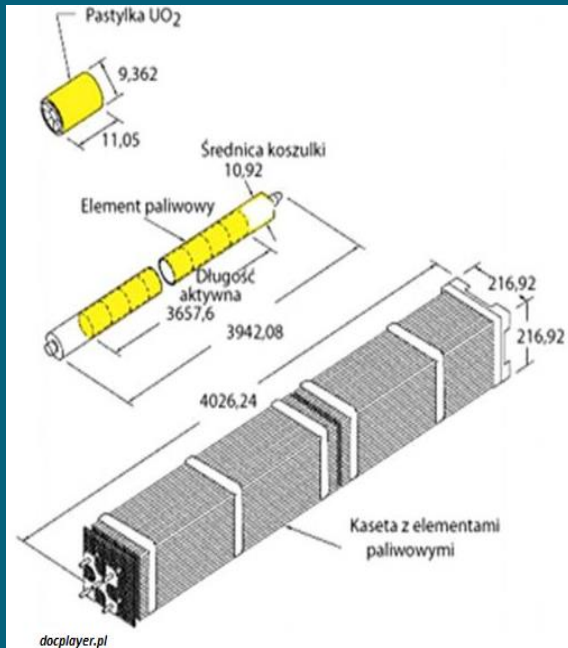
Siłownię parową zastosowano po raz pierwszy na parowcu Turbinia

- eksperymentalnym statku zbudowanym w 1894 roku w Newcastle upon Tyne przez Charlesa Parsonsa,

Napęd jądrowy w okręcie podwodnym

Początkowo paliwem jądrowym były – pastylki uranowe zamknięte w rurowych pojemnikach cyrkonowych łączonych w zestawy kasetowe o przekroju kwadratowym – wykorzystywane do dzisiaj w reaktorach energetycznych .

Kasety paliwowe zastąpiono płytami metaliczno- ceramicznymi zawierającymi UO_2 oraz stopami uran-aluminium, uran-cyrkon (15%, cyrkonu i 85 % uranu o wzbogaceniu 93 %). Paliwo typu *Caramel* używane we francuskich okrętach podwodnych to zatopione prostokątne płytki UO_2 o grubości 1,45 mm i długości 17,1 mm oddalone od siebie o 1,5 mm w płycie wykonanej ze stopu cyrkonowego o grubości 2,22 mm.





Napęd jądrowy w okręcie podwodnym

W okrętach z napędem jądrowym używane jest paliwo o bardzo dużym wzbogaceniu

Przy wysokim (90 %) wzbogaceniu wymiana przewidywana jest co 30 - 40 lat co odpowiada żywotności okrętu. By wydłużyć czas pomiędzy kolejnymi wymianami paliwa wprowadzane są do rdzenia substancje (gadolin, kwas borowy w chłodziwie) pozwalające regulować reaktywność reaktora stabilizując reakcję łańcuchową. W miarę wypalania się paliwa substancje te są usuwane.

W pierwszych okrętach podwodnych **Stanach Zjednoczonych** stosowano paliwo o wzbogaceniu 97,3 %.

W **Wielkiej Brytanii** korzystającej z doświadczeń amerykańskich stosuje się uran również o wzbogaceniu 97,3 %.

W **Rosji** stosowane wzbogacenie jest bardzo zróżnicowane. Pierwsze jednostki pracowały ze wzbogaceniem 20 - 21 % później wprowadzono nowe reaktory wykorzystujące uran o wzbogaceniu 21 - 45 %, a najnowsze używają uranu wzbogaconego do 50 - 90%.

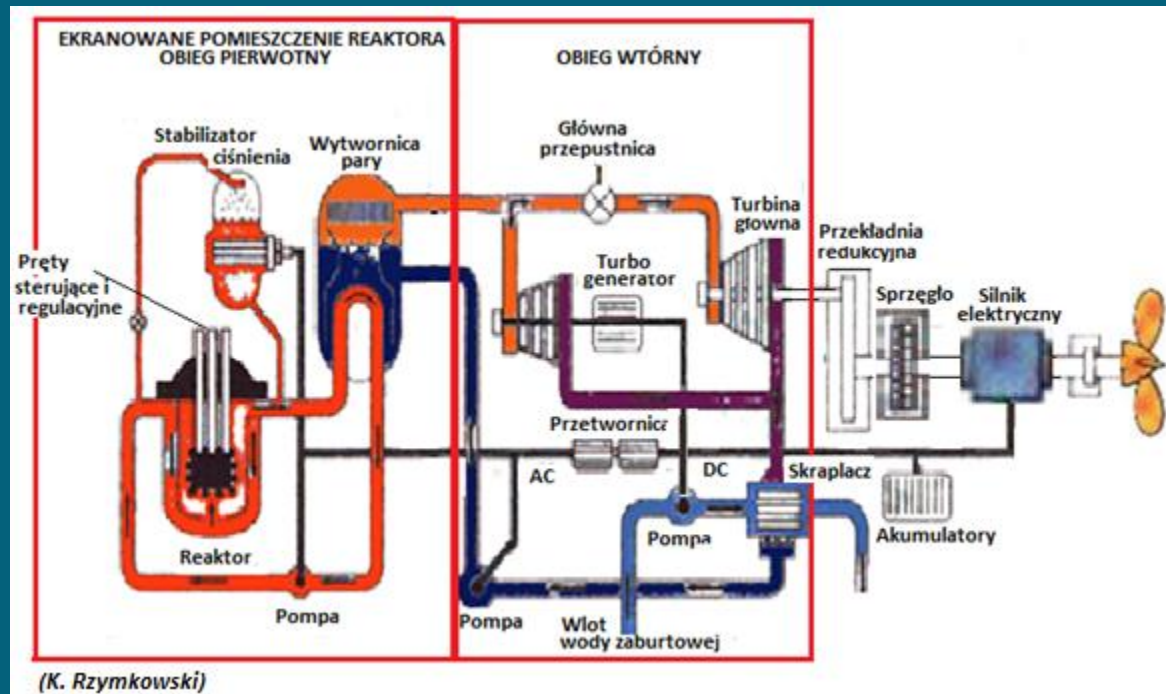
We **Francji** na pierwszym okręcie podwodnym, budowanym wg, francuskiego projektu reaktor pracował z uranem o wzbogaceniu 90 %. W następnych okrętach projektowane jest wzbogacenie tylko 7,5 % i w przyszłości reaktory mają używać uranu o wzbogaceniu stosowanym w elektrowniach jądrowych tj. 4 - 5%.

W **Indyjskich** okrętach podwodnych wykorzystywane są doświadczenia rosyjskie stosowane jest wzbogacenie 20 %.

W okrętach **CHRL** wzbogacenie paliw zawiera się w granicach 3 - 5 % podobnie jak w energetyce.

Wymiana paliwa przy niskim wzbogaceniu odbywała się zwykle co 6 - 10 lat. Dalsze obniżanie wzbogacenia uranu do poziomu wzbogacenia w reaktorach energetycznych może skrócić te czas do 1-2 lata.

Napęd jądrowy w okręcie podwodnym



Siłownia okrętu podwodnego

Energia cieplna z reaktora jest przekazywana przez chłodziwo (w reaktorach PWR – wodę) pierwotnego obiegu do wytwornicy pary. Woda w obiegu pierwotnym jest utrzymywana pod wysokim ciśnieniem, regulowanym automatycznie, nie dopuszcza się do jej wrzenia oraz przemiany w parę. Powstała w wytwornicy para w obiegu wtórnym napędza turbinę parową. Moc na wał napędowy przenoszona jest przez przekładnie mechaniczne. W nowych konstrukcjach francuskich i chińskich turbina parowa napędza prądnicę, a powstała energia elektryczna napędza silnik poruszający wał napędowy.

Napęd jądrowy w okręcie podwodnym

Redukcja szumów - ślad dźwiękowy

Główną przyczyną szumów są pompy w obiegu pierwotnym i wtórnym.

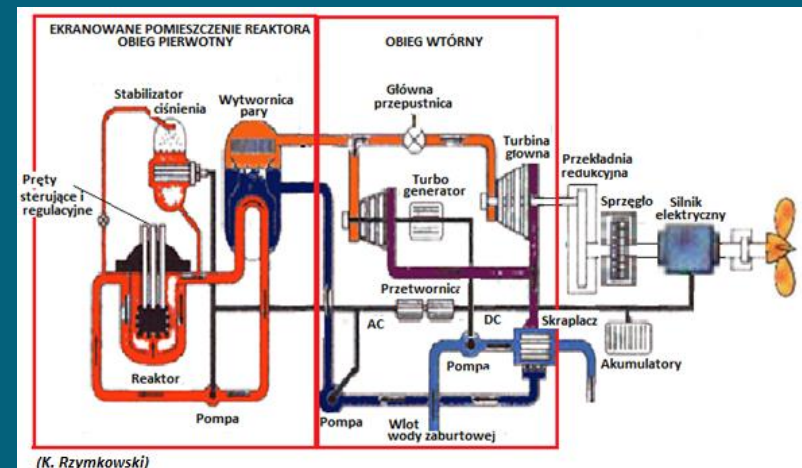
W **obiegu pierwotnym** jest kilka pętli (2 – 4) z wytwornicami pary z których każda musi posiadać własną pompę o znacznej wydajności.

W **obiegu wtórnym** pracują pompy przy znacznie niższych temperaturach.

W okręcie konstrukcji amerykańskiej typu *Ohio* wykorzystano zjawisko zmiany gęstości wody wraz z temperaturą eliminując częściowo pompy włączane w chwilach konieczności podwyższenia szybkości okrętu.

W okrętach wojennych stosowane są systemy składające się z jednej lub więcej turbin zapewniający maksymalną elastyczność zmiany mocy napędowej we wszystkich przedziałach prędkości.

Dąży się zmniejszenia ilości turbin i przekładni redukcyjnych i wprowadzenia napędu elektrycznego.



Napęd jądrowy w okręcie podwodnym

Redukcja szumów - ślad dźwiękowy

Zjawisko kawitacji powodujące powstawanie mikro pęcherzyków gazowych, których pękanie wywołuje hałas i degradację śruby. W latach osiemdziesiątych w Wielkiej Brytanii (typu *Trafalgar*) i w Stanach Zjednoczonych (typu *Seawolf*) śrubę okrętową zastąpiono pędnikiem wodnoodrzutowym zmniejszającym znacząco hałas.

Generacja szumów w okręcie typu *Seawolf* wprowadzono: zmianę sposobu napędu, zmiany w budowie kadłuba redukując elementy wywołujące zawirowania i pokrywając kadłub powłoką **anechoiczną** (*anechoic coatings*) nazywaną w literaturze, zabiegami specjalnymi (*Special Hull Treatments*). Zadaniem powłoki było wygłuszanie dźwięków z wnętrza okrętu i pochłanianie (tłumienie) fal dźwiękowych systemów tropiących okręt.

W nowoczesnych konstrukcjach okrętów podwodnych wprowadzane są materiały izolacyjne tłumiące drgania elementów siłowni okrętu, kontrolowanych przez komputerowy system aktywnego tłumienia drgań elementów.

Prowadzone są badania nad bezgłośnym systemem napędu, wykorzystującym pole magnetyczne i elektryczne działające na strumień wody wytwarzając siłę powodującą jego wirowanie w kanale tworząc kierunkowy przepływ eliminując śrubę, wał napędowy, przekładnię napędu.

Idea budowy takiego napędu powstała na Uniwersytecie kalifornijskim. Eksperymentalny model łodzi wykorzystującej ten napęd powstał w Japonii.

Próby wykazały pewne dość istotne wady napędu, np. wytwarzanie pęcherzyków wodoru w wyniku elektrolizy wody i korozję elektrod.

Napęd jądrowy w okręcie podwodnym

Chłodziwo

Okręty wojenne są wyposażone w reaktory wodno ciśnieniowe PWR.

Reaktor chłodzony ciekłym sodem (General Electric Program NNPP) na okręcie typu *Seawolf* pracował z neutronami o wyższych energiach. Wymagało to wprowadzenia dodatkowego moderatora w celu uzyskania wyższej sprawności energetycznej całości systemu i zmniejszeniu wymiarów rdzenia.

Wady systemu

Sód reaguje bardzo gwałtownie z wodą by zmniejszyć ryzyko pożaru proponowano przesyłanie sodu w podwójnych rurach między którymi miała być rtęć stanowiąca rodzaj izolatora dla sodu i jego detektora. Wykrycie sodu w rtęci sygnalizowało nieszczelności systemu.

Sód ulega aktywacji i staje się radioaktywny co wymaga dodatkowych zabezpieczeń szczególnie w czasie prac remontowych.

W czasie postoju reaktor jest wyłączony ciekły metal przechodzi do stanu stałego i dlatego konieczne jest stałe jego podgrzewanie. Zastygnięcie chłodziwa w systemie uniemożliwia ponowne uruchomienie reaktora. Było to powodem wycofania kilku okrętów z użytkowania.

W Związku Radzieckim przeprowadzono eksperymenty z reaktorami chłodzonymi **stopem ołowiu z bizmutem** i mimo trudności użytkowano okręty z takimi reaktorami przez kilka lat, ostatecznie rezygnując z nich w 1981 roku.

Napęd jądrowy w łodziach podwodnych

Badania naukowe

Łodzie podwodne napędem jądrowym przeznaczone do badań oceanograficznych, badań geologicznych, instalacji i konserwacji urządzeń podwodnych, poszukiwania i odzyskiwania zagubionych elementów katastrof nad wodami morskimi.

Pierwsza powstała łódź podwodna w Stanach Zjednoczonych NR – 1 (nieformalna nazwa *Nerwin*), była najmniejszą jednostką podwodną z napędem jądrowym. Kompletna załoga NR – 1 składała się 11 osób + 2 naukowców (przewidywany maksymalny okres zanurzenia 25 dni). Wyposażenie łodzi było przystosowane do wykonywania mechanicznych prac podwodnych zbierania próbek opracowanie map dna oceanu, prądów morskich rozkładu temperatur.



W ZSRR zbudowano łódź AS-31 lub AS – 12 (nieoficjalna *Łoszarik*) przeznaczonej do celów badawczych i ratownictwa oraz specjalnych operacji wojskowych. Długość okrętu wynosi ok 60 m. wykorzystywany jest tam reaktor PWR typu E – 17, załogę stanowi 25 osób w stopniach oficerskich.

Podczas wykonywania pomiarów dna na rosyjskich wodach terytorialnych w lipcu 2019 roku na okręcie wybuchł pożar. Zginęło 14 osób.

ŁĄCZNOŚĆ

- Okręty podwodne z napędem jądrowym uzbrojone w rakiety balistyczne są głównie wykorzystywane poza morzem szelfowym na głębokich wodach oceanicznych, morzu arktycznym gdzie ich główna zaleta – pozostawanie w ukryciu dzięki możliwości długiego przebywania w zanurzeniu przy maksymalnej szybkości pozwala na przeprowadzenie ataku lub kontr ataku w najkorzystniejszym czasie.
- Okręty podwodne, będąc w zanurzeniu około 500 m są niewidoczne dla radarów samolotowych i satelitarnych systemów obserwacyjnych. Do komunikacji z nimi stosowane są specjalne systemy pracujące na bardzo niskich częstotliwościach, wymagające bardzo dużych mocy, generujących sygnały w głębokich sztolniach oddalonych od siebie o kilkadziesiąt kilometrów (60 km) wykorzystując jądro ziemi jako antenę.
- W stanach Zjednoczonych System łączności GOLIAT znajduje się w Stanie Wisconsin w Rosji System ZEUS jest umieszczony w pobliżu Murmańska
- Do łączność z okrętami brytyjskimi i francuskimi wykorzystywany jest system GOLIAT.
- W Indiach opracowano system łączności pozwalający na przesyłanie ograniczonych sygnałów do okrętów zanurzonych na małych głębokościach.

Okrety nawodne z napędem jądrowym

Historia

Obecnie na świecie pływa ok. 200 okrętów wykorzystujących energię jądrową i 180 reaktorów do napędu i wytwarzania energii elektrycznej.

Okrety wykorzystujące energię jądrową

Typ okrętu	St. Zjed.	Rosja	Wlk. Bryt.	Francja	Chiny	Indie
Lotniskowiec	10	-	-	1	1	-
Krążownik	4	4	-	-	-	-
Okręt podwodny	>60	>60	Ok.30	Ok.30	6	1





Okrety nawodne z napędem jądrowym

Historia

Napęd jądrowy we flocie nawodnej umożliwia **długie przebywania okrętów na morzu bez konieczności częstego uzupełniania paliwa** co jest wykorzystywana przede wszystkim w lotniskowcach.

Pierwszym okrętem nawodnym z napędem jądrowym był krążownik raketowy **Long Beach (1957)**. Jednocześnie rozpoczęto budowę pierwszego lotniskowca z napędem jądrowym **Enterprise (1961)**, kolejnym był okręt krążownik **Bainbridge (1962)** Te trzy okręty utworzyły oddział specjalny do wykonania operacji *Operation Sea Orbit* polegającej na okrążeniu Ziemi bez zawijania do portów. Operacja trwała 65 dni.

Enterprise (1960) Był prototypem lotniskowców klasy **Nimitz** (od admirała Chestera Nimitza). Podstawowe dane:

- całkowita długość okrętu wynosi 332,8 m,
- maksymalna szerokość do 78,8 m,
- szybkość 30 węzłów (podawana oficjalnie), zasięg nieograniczony,
- załoga jest podzielona na marynarzy – 3300 osób i obsługę lotniczą – 3000 osób.
- 130 samolotów różnych typów,
- napęd dwa reaktory typu PWR A4W/ A1G mocy 550 MWth.
- wymiana paliwa po 20 latach użytkowania

Demontaż i unieszkodliwianie napędu jądrowego okrętów

Zakładany czas eksploatacji okrętu wynosi 20 – 30 lat.

Problem demontażu okrętu i sposób postępowania z wysoko aktywnym paliwem i materiałami promieniotwórczymi jest w każdym kraju odmienny

Demontaż okrętu:

- usunięcie wypalonego paliwa ,
- usunięciu chłodziwa
- usunięcia reaktora.
- wszystkie aktywowane i promieniotwórcze części są składowane w wydzielonym podziemnym składowisku,
- wypalone paliwo jest po odpowiednich zabezpieczeniach składowane w przystosowanym składowisku,
- wszystkie prace muszą być wykonywane w specjalizowanych stocznich,

W Stanach Zjednoczonych zdemonowano do 2017 roku w ten sposób 117 okrętów podwodnych. Ponieważ oczekiwanie na demontaż może się przedłużać wycofane ze służby okręty szczególnie kadłub i reaktor znajdują się pod stałą kontrolą techniczną.

We Francji usuwane jest paliwo, a części promieniotwórcze są składowane w suchym doku by po obniżeniu aktywności można było dokończyć demontaż.

W Wielkiej Brytanii system demontażu części jądrowej jest podobny i składowanie „pustych” kadłubów okrętów i ich demontaż w krajowej stoczni prywatnej. Składowano więcej okrętów wycofanych z użytkowania niż było aktywnych.

W Rosji wycofane ze służby okręty (około 130) stały zacumowane a portach wojennych. Po 20 latach miały problemy z unoszeniem się na powierzchni. Zdemonowane reaktory i paliwo jądrowe, i po zapełnieniu składowiska zaczęto zatapiać reaktory jądrowe (16) wraz paliwem (6) w Morzu Karskim w pobliżu Nowej Ziemi.

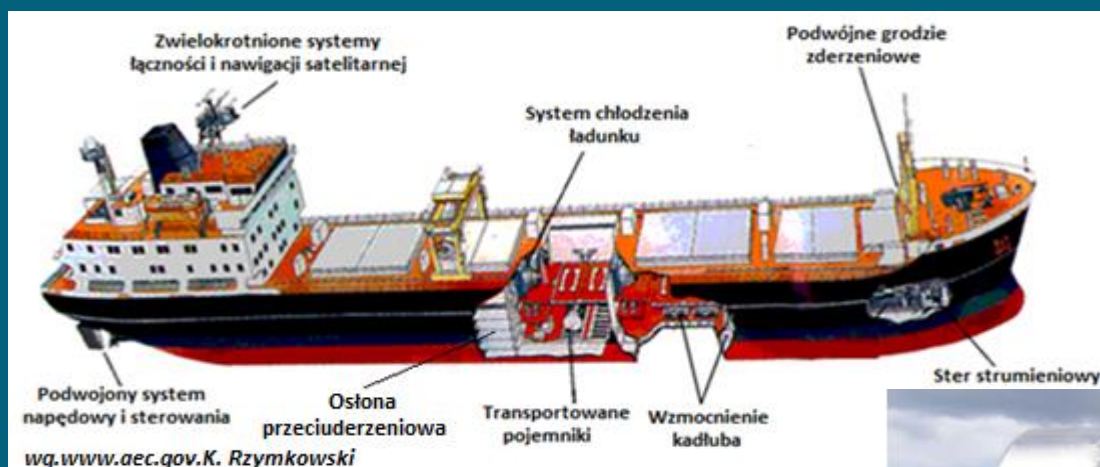
Transport morski materiałów jądrowych

☐ Zużyte paliwo jądrowe marynarki wojennej jest pakowane do wysyłki w specjalnych pojemnikach, które spełniają wszystkie wymagania Programu Morskiego Napędu Jądrowego:

Test wytrzymałości na wstrząsy polega na swobodnym upadku pojemnika z wysokości 9 m lub upadku na pojemnik masy 0,5 t również z wysokości 9 m. Swobodny upadek odpowiada uderzeniu z prędkością 50 km/h.

Test udarowy odporność pojemnika na przebicie i uszkodzenie jego powierzchni i polega na swobodnym upadku pręta hartowanego o średnicy 3,2 cm z półkolistym zakończeniem i masie 6 kg z wysokości 1,3 m).

Test szczelności pojemnika polega na zanurzeniu go w basenie na głębokości 15 m na okres 8 godzin. Odpowiada to ciśnieniu ok. 150 kPa. W (transport wypalonego paliwa) zanurzenie powinno wynosić 200 m przez 1 godzinę. Ciśnienie ok. 2 MPa. Badanie należy wykonywać po przeprowadzeniu testu wstrząsu lub testu udarowego oraz badań termicznych



Statki z napędem jądrowym

Napęd jądrowy na frachtowcach

Zbudowano cztery takie jednostki: *Savannah* w St. Zjed., *Otto Hahn* w Niemczech, *Siewmorput* w ZSRR, *Mutsu* w Japonii. Okazały się one zbyt kosztowne w eksploatacji, wymagały wysoko wykwalifikowanych załóg, dodatkowych kontroli. Jedynymi jednostkami „cywilnymi” z napędem jądrowym były i są lodołamacze opracowane i produkowane w Rosji (ZSRR). Pierwszym był lodołamacz *Lenin* z wodno ciśnieniowymi reaktorami pracującymi z nisko wzbogaconym (5%) uranem. Powstały późniejsze konstrukcje typu *Arktika*.



Lenin



Rossiya



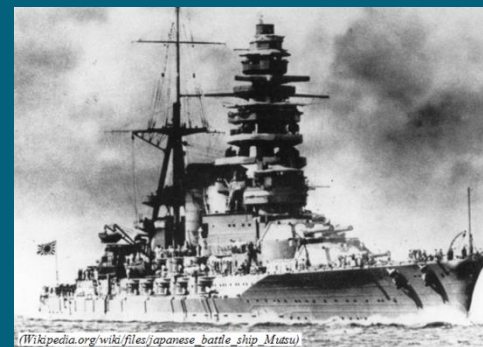
Arktika i Sibir

Statki z napędem jądrowym

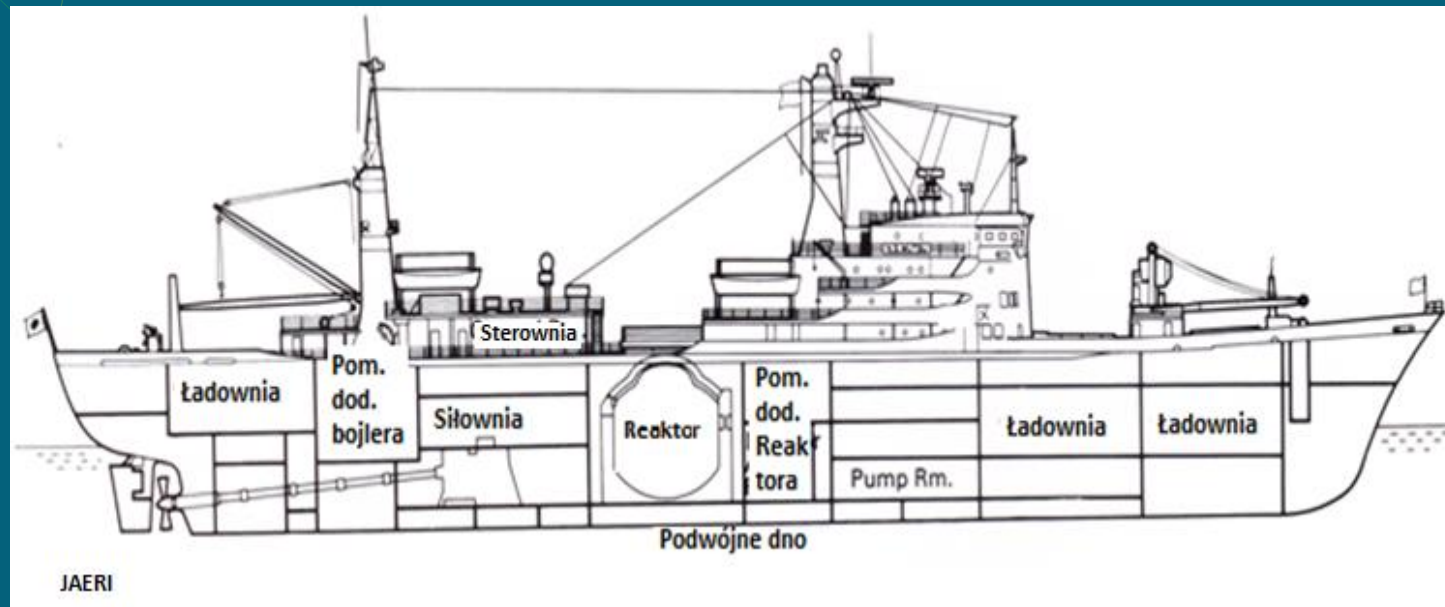


Statki z napędem jądrowym

Japońskie Stowarzyszenie Budowy Statków z Napędem Jądrowym (*Japan Nuclear Ship Research Association - JNSRA*) podpisało w 1961 roku kontrakt z Rządową Agencją Nauki i Techniki (*Japanese Government Science and Technical Agency - JGSTA*) na budowę statku z napędem jądrowym do badań oceanograficznych i transportowych uzasadniając to, między innymi, położeniem geograficznym.

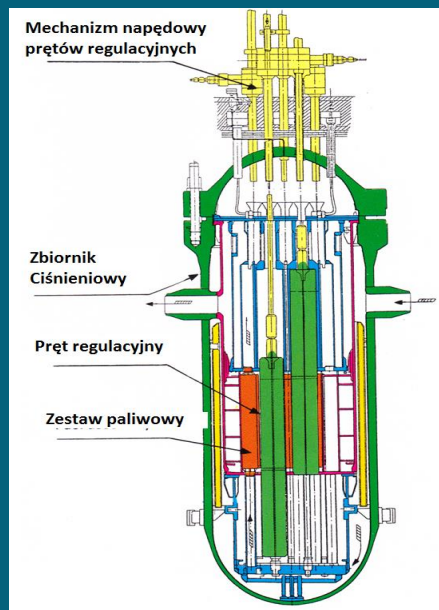
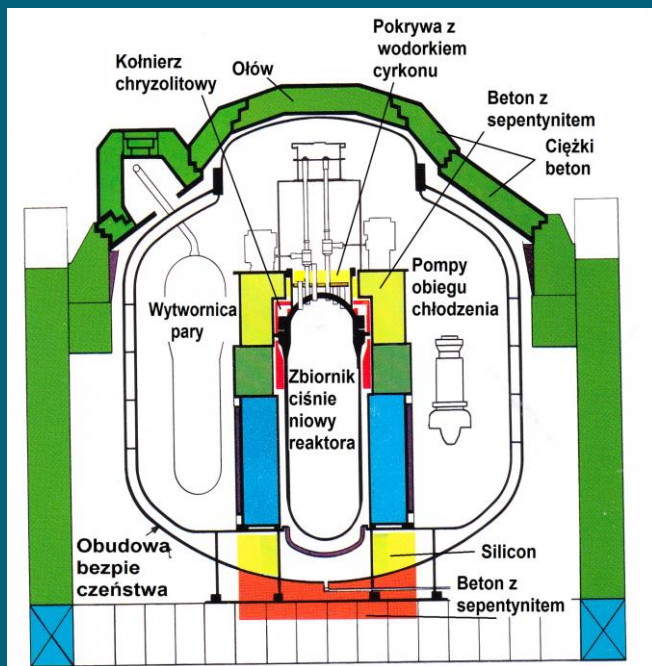


Statki z napędem jądrowym



Długość 130,00 m, szerokość 19,00 m, wysokość burty 13,20 m, tonaż brutto 8,242 t, główny silnik 10 000 KM, prędkość eksploatacyjna 16,5 węzła (Mn/h), załoga 80 osób, przewidywany zasięg bez uzupełniania paliwa przy wykorzystaniu napędu jądrowego 145 000 Mm, konstrukcja ze specjalnymi wymaganiami stabilności, systemów przeciw kolizyjnym i sztrandowania (awaryjne osiadanie na płyciźnie), automatyczny system radarowy, międzynarodowy morski system satelitarny (JAERI)

Statki z napędem jądrowym





Perspektywy rozwoju napędu jądrowego

Savannah w St. Zjed., **Otto Hahn** w Niemczech, **Siewmorput** w ZSRR, **Mutsu** w Japonii oraz lodolamacze opracowane i produkowane w Rosji (ZSRR) Pierwszym był lodolamacz **Lenin** z wodno ciśnieniowymi reaktorami pracującymi z nisko wzbogaconym (5%) uranem. Powstały późniejsze konstrukcje typu *Arktika*.

Ograniczenie zmian klimatycznych przez ograniczenia emisji gazów cieplarnianych, usuwanie zanieczyszczeń powietrza, nowoczesne bezpieczne jądrowe reaktory energetyczne, małe reaktory modułowe wykorzystujące nisko wzbogacony uran, powoduje ponowne zainteresowania napędem jądrowym

W żegludze handlowej zaczynają dominować duże jednostki jak kontenerowce, tankowce transportujące gaz, ropę, węgiel, chemikalia, itp. wymagające znacznej energii do napędu i utrzymania pracy urządzeń statków.

Starania rozpoczęła w 2009 roku, jako jedna z pierwszych, **chińska firma Cosco**.

Brytyjska firma (2010) budująca tankowiec LNG wykazała, że na pewnych trasach napęd jądrowy byłby bardzo atrakcyjny.

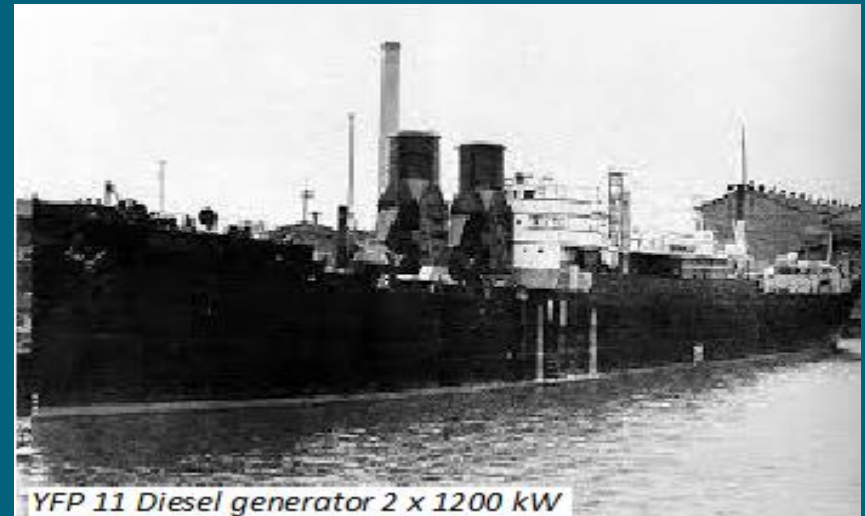
Lloyds's z amerykańską firmą Hyperion Power Generation, brytyjskim BMT i operatorem greckim rozpoczęli w 2010 badania nad możliwością wykorzystania małego modułowego reaktora o mocy 70 MWth do napędu tankowca. Reaktor byłby reaktorem prędkim z chłodziwem metalicznym ołowiuowo-bizmutowym. Czas pracy reaktora przewidziano na 25 lat.

Rozpoczęto też wstępne prace unifikacyjne dotyczące certyfikowania statków z napędem jądrowym z wymaganiami dotyczącymi lądowych reaktorów energetycznych. Wyniki tych prac przedstawiono w 2014 roku.

Pływające elektrownie

Statki elektroenergetyczne – Power Ship

- -są to statki na których zamontowane są urządzenia przeznaczone do wytwarzania energii elektrycznej :turbiny gazowe, kotły parowe, silniki diesla, reaktory jądrowe .Mogą to być przystosowane do tego celu frachtowce lub barki. Najczęściej jednak są to nowe specjalne konstrukcje.
- Powstające Elektrociepłownie na barce, mogą zaopatrzyć w energię elektryczną i ciepło 10 -20 tysięczną miejscowość z dostępem do żeglownych zbiorników wodnych, znajdujących się w trudno dostępnym obszarze jak np. na wyspach, obszarach pustynnych, arktycznych, gdzie dostęp w ciągu roku jest ograniczony i dowóz bądź dostarczanie kopalnych źródeł energii jest niemożliwe lub bardzo kosztowne.
- Jedną z pierwszych konstrukcji był SS *Jacona* (1931) zbudowany w stoczni w Newport News w Wirginii wyposażony w dwa generatory każdy o mocy 10 kW.
- Pierwszą pływającą elektrownią jądrową był MH-1A



Pływające elektrownie jądrowe

Wojskowe programy jądrowe

W 1954 rozpoczęto Wojskowy Program Jądrowy, którego celem było opracowanie małych wodnych reaktorów ciśnieniowych przeznaczonych wytwarzania energii elektrycznej i celów grzewczych w trudno dostępnych obszarach głównie w odległych bazach wojskowych.

Celem Programu Jądrowego Marynarki Wojennej było opracowanie reaktorów dla łodzi podwodnych i napędu okrętów i statków transportowych.

- Pierwszy taki prototypowy mały reaktor SM-1 (*Stationary and Medium Size*) opracowany przez wojskowy zespół badawczy i zbudowany w Fort Belvoir (Wirginia) nad rzeką Potomac.
- W 1957 roku reaktor był wykorzystywany do celów szkoleniowych w wojskach lądowych, powietrznych i marynarce.



Pływające elektrownie jądrowe

Pierwsza jądrowa elektrownia pływająca

W sąsiedztwie MH-1 zacumowano w roku 1966, pierwszą pływającą elektrownię jądrową MH-1A. Elektrownię umieszczono w kadłubie statku transportowego *Sturgis* (przed zmianą przeznaczenia *SS Charles H. Cugle*) typu Liberty, produkowanego masowo w czasie II Wojny Światowej.

Ze względów ekonomicznych, usunięto silniki napędowe zyskując dodatkową przestrzeń. Budowę reaktora rozpoczęto w 1963 a uruchomiono go w styczniu 1967 roku.

Moc elektrowni wynosiła 10 MW. Paliwem w reaktorze był nisko wzbogacony uran (4%-7%).



Transportowiec Typu Liberty



Sturgis MH-1A w czasie testów przy nadbrzeżu Fort Belvoir (US Army Corps of Engineers)

Pływające elektrownie jądrowe

Wykorzystanie pierwszej elektrowni pływającej

- W 1968 roku elektrownia MH-1A została przeholowana do jeziora Gatun w Panamie gdzie wykorzystywana ją do zasilania urządzeń Kanału Panamskiego do roku 1975.
- W 1976 roku rozpoczęto holowanie elektrowni do portu macierzystego wykonując po drodze remont w bazie wojskowej, konieczny z powodu uszkodzeń powstałych w czasie sztormu.



Sturgis MH-1A holowany w Panamie do miejsca postoju jezioro Gatun (US Army Corps of Engineers)



Pływające elektrownie jądrowe

Likwidacja elektrowni MH-1A

- Sturgis powrócił do Fort Belvoir w 1977 roku, gdzie wyładowano paliwo a następnie przeholowano go na rzekę James w pobliżu Fortu Eustis.
- W ciągu całego okresu pracy elektrowni dokonano pięciokrotnie wymiany paliwa w rdzeniu.
- Ostateczną likwidację elektrowni zaplanowano na rok 2014, ale wystąpiły znaczne opóźnienia i jej nie dokonano.



Pływające elektrownie

Współczesne rozwiązania

- Turecki koncern Karadeniz Power Ship Ltd.Co oferuje *Power of Friendship* o mocy 126 MW.



- Koreańskie koncerny Polaris Shipping, Midland Power, i Hyundai Heavy Industries oferują *Mobile Powership* o mocy 880 MW.



Współczesne propozycje

- Fiński koncern Wartsila proponuje pływającą farmę wiatrową o mocy 5 MW z siły wiatru i 2,6 MW z falowania.



- W Japonii powstaje projekt budowy pływającej farmy solarnej o mocy 13,7 MW



Pływające elektrownie jądrowe

W 2000 roku Ministerstwo Energii Atomowej w Rosji podjęło decyzję budowy serii pływających elektrowni jądrowych.

Seryjna produkcja pływających elektrowni pozwoliłaby obniżyć koszt produkcji od 25-30%. Planowano do roku 2015 wybudować 7 elektrowni.

Budowę barki *Akademik Łomonosow* rozpoczęto 2007 w bazie łodzi podwodnych Sewerodwińsku. Budowę przeniesiono w 2007 do stoczni w Petersburgu w której miały powstać kolejne barki. Budowę kadłuba *Akademika* zakończono i w czerwcu 2010 roku został on zwodowany. Oddanie elektrowni do użytku jest planowane w 2018 roku. Następna elektrownia ma powstać w 2030.



Pływające elektrownie jądrowe

- Projekt pływającej elektrowni jądrowej z urządzeniami nadbrzeżnymi wg. OKBM Afrikantow i Instytut Badań i Rozwoju Atomenergoproekt z Niżnego Nowogrodu z dwoma reaktorami KLT – 40S budowanej w stoczni w Petersburgu jako *Akademik Łomonosow*



Długość barki 144 m, szerokość 30 m, wysokość burty 10 m, zanurzenie 5,6 m, wyporność 21000 t. Załoga elektrowni *Akademik Łomonosow* to 69 osób.



Pływające elektrownie jądrowe

- W elektrowni wykorzystano dwa zmodyfikowane wodno ciśnieniowe reaktory rosyjskiej konstrukcji typu KLT-40 stosowane w systemach napędowych lodołamaczy klasy *Tajmyr*.
- Zmodyfikowany reaktor KLT – 40S ma moc 70 MW energii elektrycznej lub 300 MWth energii cieplnej wystarczającej do zasilania 200 000 miasta.
- Energia może być też wykorzystana do odsalania wody morskiej. Wydajność odsalania wynosi 240 000 m³/dzień.
- Paliwem w reaktorze jest uran o wzbogaceniu 14%.
- Czas „życia” reaktorów przewidziano na 40 lat. Co 12 lat elektrownia będzie odholowywana do stoczni w celu przeprowadzenia niezbędnych prac remontowych.
- Całkowita wymiana paliwa ma być dokonywana co 2-3 lata.
- Rdzeń reaktora zawiera 1273 kg uranu. W pływającej elektrowni znajdują się magazyny świeżego paliwa, magazyn paliwa wypalonego i przechowalniki odpadów radioaktywnych ciekłych i stałych.
- Magazynowanie wypalonego paliwa jest dwu stopniowe. Bezpośrednio po wyjęciu z rdzenia jest ono schładzane w tzw. mokrym magazynie by po ostudzeniu do odpowiedniej temperatury mogło być przeniesione do suchego przechowalnika gdzie jest chłodzone powietrzem.

Pływające elektrownie jądrowe



Pływające elektrownie jądrowe

Ochrona i kontrola materiałów jądrowych

Pływająca elektrownia jądrowa wymaga dostosowania do obowiązujących regulacji prawnych krajowych i międzynarodowych.

- Przy użytkowaniu pływających elektrowni jądrowych muszą być wypełnione:
- wymogi krajowych przepisów bezpieczeństwa jądrowego,
- zalecenia MAEA,
- przepisy Morskiego Rejestru Statków z napędem jądrowym,
- przepisy przemysłu stocznioowego,
- wymagania Międzynarodowej Organizacji Morskiej (*International Maritime Organization* - specjalistyczna agencja ONZ odpowiedzialna za bezpieczeństwo transportu morskiego i zapobieganie zanieczyszczanie morza przez statki).
- Powinny być też uwzględnione zalecenia dotyczące ochrony środowiska.



Pływające elektrownie jądrowe

Ochrona i kontrola materiałów jądrowych

- Pływające elektrownie jądrowe muszą wypełniać zalecenia obowiązujące w przemysłowych elektrowniach jądrowych i wynikające z wymagań Międzynarodowego Traktatu o Nie rozprzestrzenianiu Broni Jądrowej (*NPT - Non Proliferation Treaty*) dotyczących systemu zabezpieczeń (*Safeguards*).
- Rosja (wraz z innymi potęgami nuklearnymi Wlk. Brytania, St. Zjednoczone , Francja, Chiny) jest gwarantem wypełnienia wymagań traktatu.
- Rosja może zgłosić dobrowolnie materiały jądrowe lub obiekty jądrowe do kontroli przez MAEA na warunkach ogólnych Traktatu NPT (*Voluntary offer agreement –VOA- umowa o zabezpieczeniach dobrowolnych*).
- Państwo może wycofać zgłoszone materiały jądrowe, jak i obiekty spod kontroli MAEA. Jednakże pewne działania np.: transfer materiałów jądrowych (głównie paliwa do elektrowni) do innych państw jest objęty kontrolą.

Pływające elektrownie jądrowe

Ochrona i kontrola materiałów jądrowych

- Rosja jest obecnie jedynym krajem posiadającym jądrową pływającą elektrownię (*jeszcze nie uruchomioną*)
- Podstawowym zabezpieczeniem rosyjskich elektrowni pływających działających na terytorium Federacji Rosyjskiej jest państwowa własność obiektu, jego dokumentacji technicznej i produkcyjnej oraz organizacja rozbudowanego systemu kontroli.
- Dodatkowym zabezpieczeniem jest stosowanie nisko wzbogaconego paliwa jak również przechowywanie świeżego i wypalonego paliwa wyłącznie na pokładzie barki elektrowni.
- W części lądowej elektrowni nie mogą być składowane żadne materiały jądrowe.
- W przypadku wykorzystywania elektrowni poza granicami kraju pozostaje ona zawsze pod jurysdykcją Federacji Rosyjskiej i może być obsługiwana wyłącznie przez rosyjskich specjalistów.
- Wymiana paliwa może być wykonywana w elektrowni a wyładowanie wypalonego paliwa z czasowego przechowalnika na barce musi być dokonywana wyłącznie w przystosowanych do tego celu portach Federacji, do których elektrownia będzie odholowana.
- W czasie pracy elektrowni za granicą, za jej bezpieczeństwo odpowiada państwo w którym zainstalowana jest elektrownia łącznie z przestrzeganiem Traktatu NPT, jeśli jest ono jego sygnatariuszem. Warunki użytkowania elektrowni są wzorowane na przepisach dotyczących lodołamaczy z napędem jądrowym.



Pływające elektrownie jądrowe

Ochrona i kontrola materiałów jądrowych

- **Ochrona fizyczna obiektu jądrowego** obejmuje całokształt przedsięwzięć organizacyjnych i technicznych, mających na celu skuteczne zabezpieczenie materiałów jądrowych i obiektów jądrowych przed aktami terroru, dywersji, sabotażu i kradzieży.
- **Ochrona fizyczna elektrowni pływającej** obejmuje dwa odrębne systemy ochrony: dla części pływającej i części znajdującej się na lądzie.
- Ochrona barki musi uwzględniać:
 - zmieniające się warunki akwenu (np. przyływy i odpływy, falowanie, prądy wodne, wpływ kry),
 - dostęp od strony wody na powierzchni i pod wodą w różnych warunkach pogodowych.
 - wszelkie dostępne sposoby monitoringu, systemy alarmowe, kontrole dostępu, zapory fizyczne.
- Na potrzeby każdej pływającej elektrowni, podobnie jak w elektrowniach przemysłowych są opracowywane indywidualnie procedury ochrony uwzględniające warunki cumowania.

Pływające elektrownie jądrowe

Perspektywy

- Zainteresowanie kupnem lub wypożyczeniem elektrowni pływającej od Federacji Rosyjskiej zgłosiło wstępnie kilka państw w których występują niedobory słodkiej wody np. Malezja, Indonezja, Algieria, Namibia, Argentyna w celu odsalania wody morskiej.
- Chiny i Indonezja będą opracowywać własne rozwiązania.
- W Chinach planuje się rozpoczęcie budowy zbliżonej konstrukcyjnie do *Akademika Łomonosowa* w 2017 roku. Wg planów opublikowanych przez Chińską Narodową Komisję Rozwoju i Reform (*China's National Development and Reform Commission*) pierwsza elektrownia powinna być uruchomiona w 2020 roku. Źródłem energii elektrycznej, ciepła, będzie reaktor jądrowy ACPR50S o mocy 60MW. Elektrociepłownia będzie mogła być również wykorzystywana do odsalania wody morskiej. Plany przewidują budowę 20 elektrowni. Projektowane są modyfikacje wersji reaktora ACPR





Pływające elektrownie jądrowe

Perspektywy

W kwietniu 2014 roku na sympozjum w Washingtonie dotyczącym Małych Reaktorów Modularnych, Amerykańskie Stowarzyszenie Inżynierów Mechaników z Instytutu Technologii w Massachusetts (*American Society of Mechanical Engineers, Massachusetts Institute of Technology*) przedstawiono koncepcję budowy elektrowni na platformie podobnej do platform wiertniczych zakotwiczonej kilka mil od brzegu i połączonych z lądem kablem podwodnym.

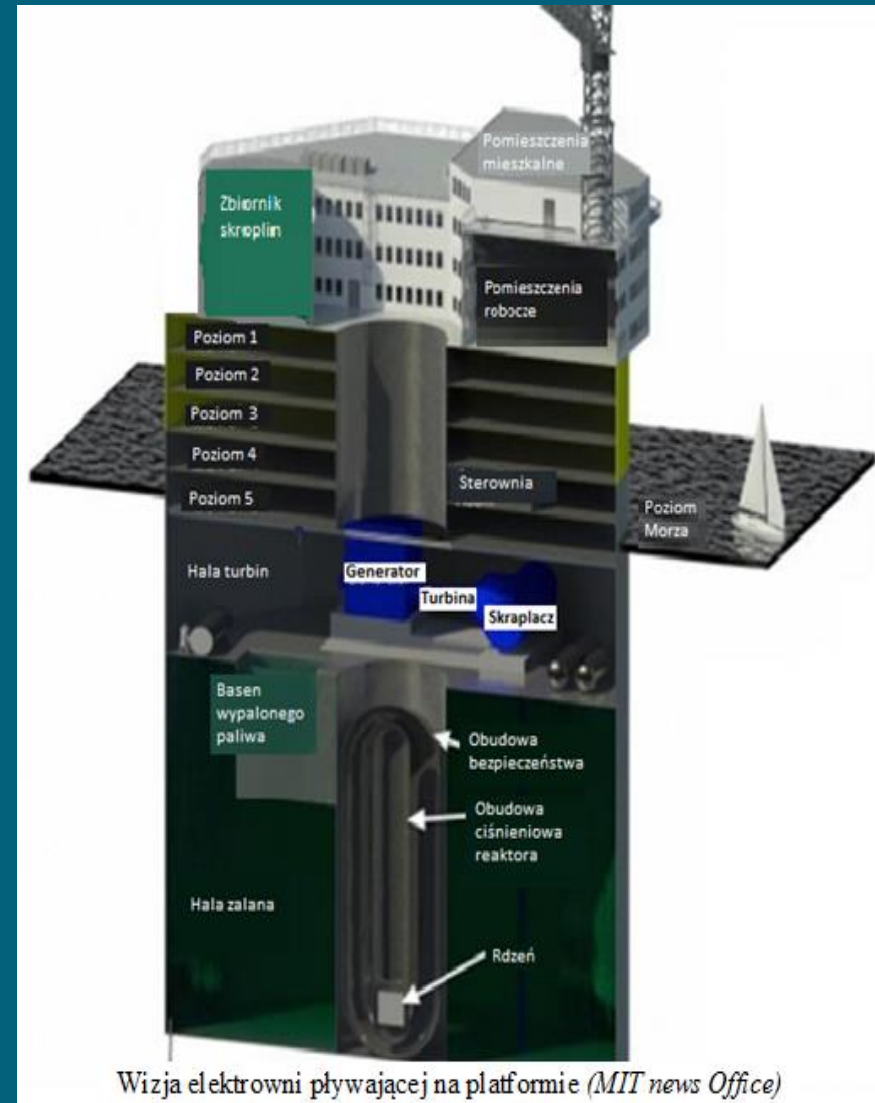
W projekcie nie wspomniano w niej o sposobach składowania świeżego i wypalonego paliwa, sposobach wymiany paliwa (wyładowanie wypalonego paliwa z tymczasowych przechowalników) wymiany załogi, koniecznych przeglądach okresowych. Nie jest jasna również koncepcja ochrony fizycznej obiektu.

Pływające elektrownie jądrowe

Perspektywy

Zaletą takiego rozwiązania jest:

- wykorzystanie dobrze opanowanych technologii budowy platform wiertniczych,
- sprawdzonych technologii wodnych reaktorów ciśnieniowych
- łatwość konstrukcji systemów chłodzących, co może zapobiec stopieniu rdzenia lub uwolnieniu materiałów radioaktywnych
- odporność na pływowe wywołane trzęsieniami ziemi.





Pływające elektrownie jądrowe

Literatura:

Floating Nuclear Plants for Seawater Desalination, IAEA-ITEDOC-940 1995

KLT-40S, IAEA 2013

MH-1A [en.wikipedia.org/wiki](http://en.wikipedia.org/wiki/MH-1A)

Prospects of Floating Power Plants, JSC Concern Rosenergoatom, Directorate for floating nuclear power plant construction.

www.rcrusia.com.ar/espanol/cooperacion/publ.pdf

I. A. Bylov, 6th INPRO Dialogue Forum on Global Nuclear Energy Sustainability: Licensing and Safety Issues for Small and Medium-sized Nuclear Power Reactors (SMRs) 29 July - 2 August 2013 IAEA Headquarters, Vienna

China plans a Floating Nuclear power Plant, www.forbes.com/.../china-builds-a-floating-nuclear-

Akademik Łomonosow Floating Nuclear Power Plant, www.youtube.com/watch?v=YpZohKz5GKE

Akademik Łomonosow Floating Nuclear Power Plant, www.youtube.com/watch

Isolated Criticality. Russia's Floating Nuclear Power Plants, www.nti.org > Articles

Indonesian nuclear power proposals, Institute Nautilus for Security and Sustainability, nautilus.org

CGN's ACPR50S Project Approved by NDRC 2016-01-12, en.cgnpc.com.cn/n1017152/n1017227/.../content.ht...

David L. Chandler, *Floating Nuclear power plants could ride out tsunamis* MIT News, www.news.mit.edu 2014

Adam Rajewski, *Morskie napędy jądrowe, Morza i Okręty Numer specjalny 1/2016* Warszawa

Broszura, *Research and development on nuclear ship* Japan Atomic Energy Research Institute, Mutsu Establishment Aomori 1990

Shuichi Sasaki, *General Description of the first Nuclear Ship "Mutsu"* Nuclear Engineering and Design 1969.

https://en.wikipedia.org/wiki/Japanese_Battle_Ship_Mutsu.

www.globalsecurity.org/military/world/japan/ns-mutsu-dev.htm Nuclear ship Development

www.worldwidescience.org/topicpages/n/nuclear+ship+mutsu.html

Case Details>Radiation Leaks from Nuclear Power Ship "Mutsu" www.sozokgaku.com/fkd/en/cfen/CA100015.html

Masayuki Nakao *Radiation Leaks from Nuclear Power Ship "Mutsu"*

www.sozokgaku.com/fkd/en/cfen/CA100015.html

NS Savannah

www.pl.sptniknews.com

www.maritime.org/tour/savannah/press/techpics.html

22. Sassa Atsuyuki, *Japan's Disastrous "Safety Myth": Ignoring the Lessons of Minor Nuclear Incidents: Nuclear Ship Mutsu...*

<http://www.nippon.com/en/features/co1901/>

Grzegorz Jezierski, *energia jądrowa wczoraj i dziś*, NT Warszawa 2016

Rzymkowski Krzysztof, *Napęd jądrowy okrętów wojennych*, PTJ Nr 4 VOL.62 Z.4 ISSN 0551-6846 Warszawa 2019

Rzymkowski Krzysztof, *Pływające elektrownie jądrowe*, PTJ Nr 3 Vol. 59 Z ISSN 0551-6846 Warszawa 2016

Rzymkowski Krzysztof, *Mutsu* PTJ Nr 1 Vol 60 Z.1 ISSN 0551-6846 Warszawa 2017

