



# Statki z napędem jądrowym i pływające elektrownie jądrowe



**SEREN**

dr inż. Krzysztof Rzymkowski  
Stowarzyszenie Ekologów na Rzecz  
Energii Nuklearnej  
SEREN-Polska

# Statki 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* - budowy bomby.

Drugi stos atomowy uruchomiono w 1944 i był przeznaczony do produkcji plutonu również na potrzeby *Projektu Manhattan*.

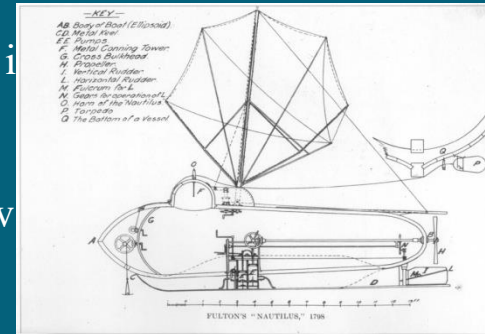
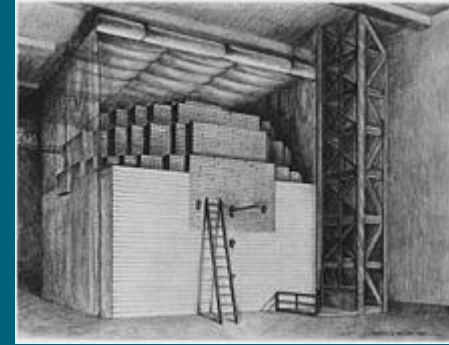
Pojawienie nowego sposobu pozyskiwania energii przyspieszyło prace badawcze nad jego wykorzystaniem do celów militarnych.

Po wejściu pierwszych okrętów podwodnych do służby, w czasie pierwszej wojny światowej stały się one jednym z kluczowych oręży 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.

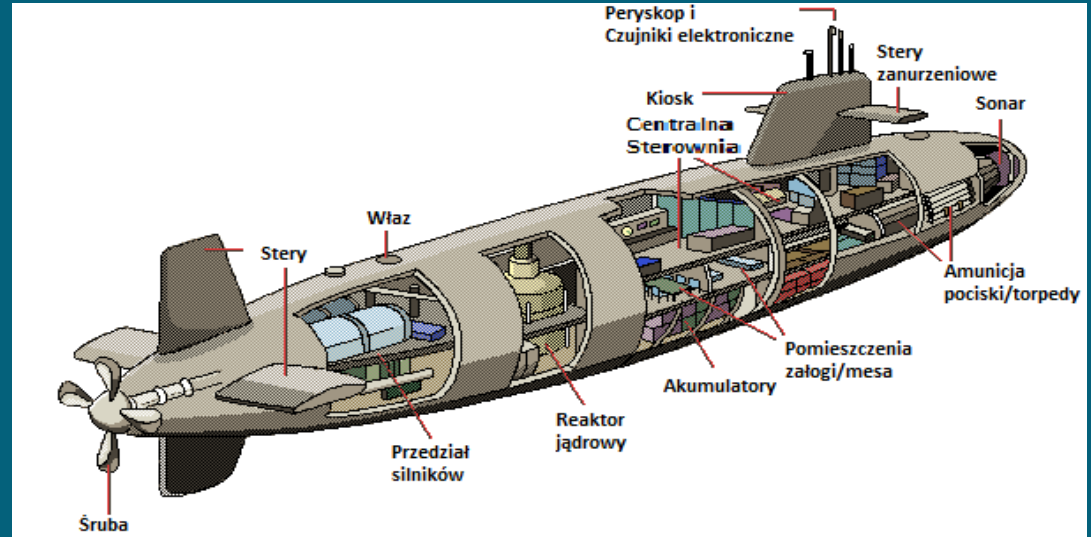
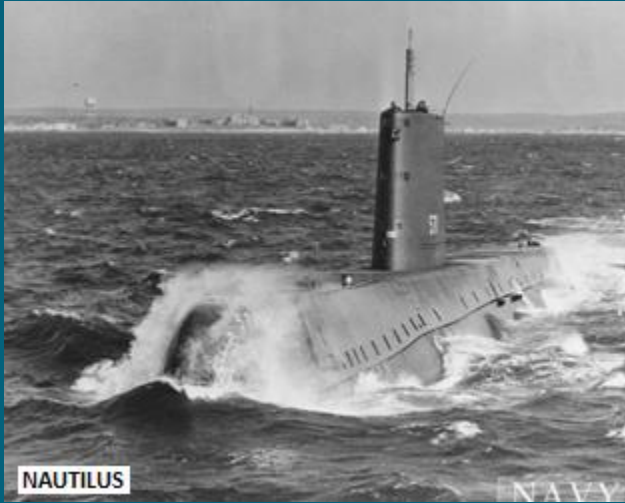
Pierwszy doświadczalny reaktor przeznaczony do napędu okrętów powstał Stanach Zjednoczonych 1953 roku, a w 1955 zwodowano pierwszy atomowy okręt podwodny *Nautilus*.

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



# Okrety z napędem jądrowym

## Historia

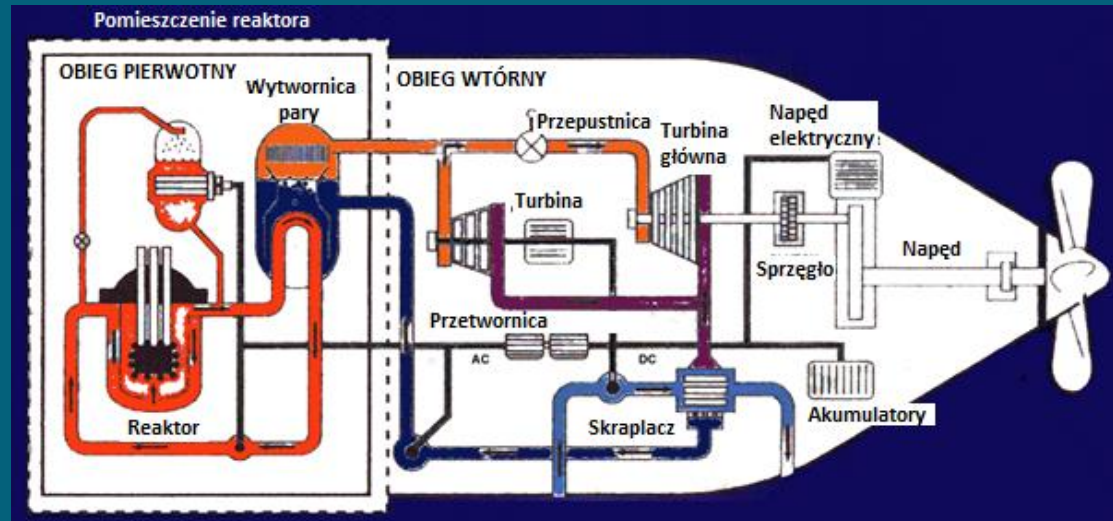


1954 – 1980

Reaktor S2W o mocy 11 MW

Prędkość 22w

1958 przepłynął pod lodem  
biegun północny



# Okrety z napędem jądrowym

## Historia

Obecnie na świecie pływa ok. 140 okrętów wykorzystujących energię jądrową 180 reaktorów do napędu i wytwarzania energii elektrycznej.

### Okrety wykorzystujące energię jądrową

Typ okrętu	St. Zjed.	Rosja	Wlk. Bryt.	Francja	Chiny	Indie
Lotniskowiec	11	-	-	1	1	-
Krażownik	9	4	-	-	-	-
Okrety Podwodny	Ok. 44	Ol. 48	11	10	6	1



# Statki z napędem jądrowym

## Napęd jądrowy na frachtowcach

Zbudowano cztery takie jednostki: *Savannah* w USA, *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*.



# Statki z napędem jądrowym



*NS Savannah 1960-1982 reaktor 38 MW  
od 1982 MS Trophy*



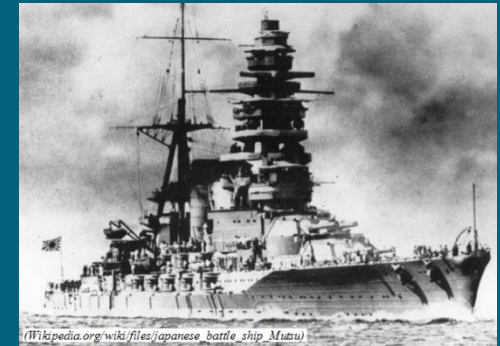
*NS Sewmorput 1983-1988 frachtowiec  
1988 lodolamacz reaktor 135 MW*



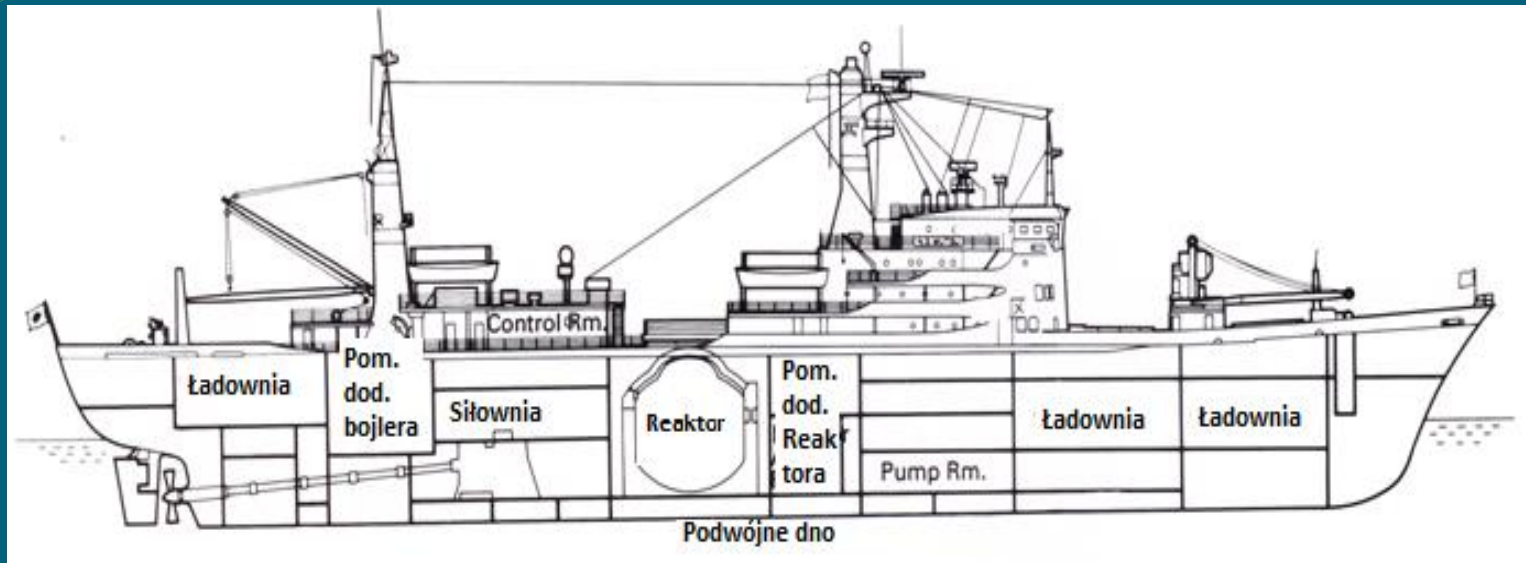
*NS Otto Hahn 1968-1979 reaktor 74MW*

# 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.



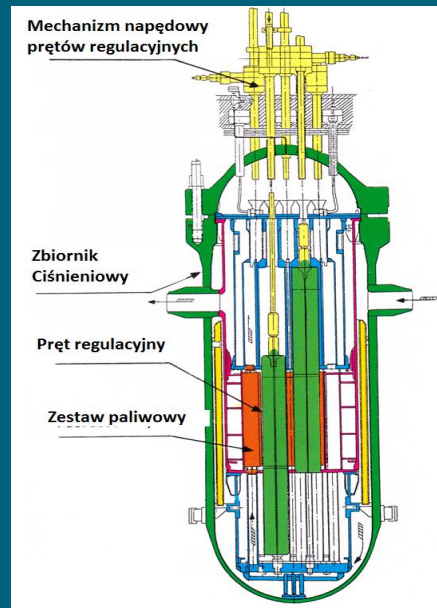
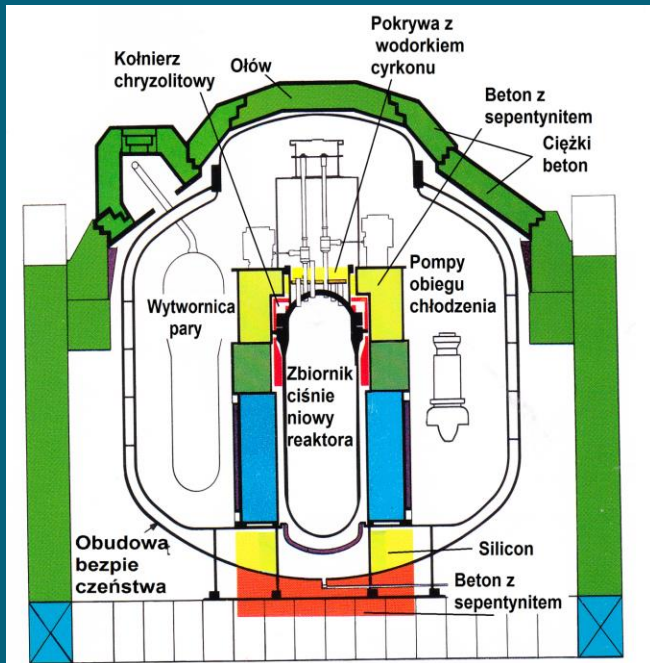
# Statki z napędem jądrowym



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



# 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



(Jacona 1931 PSNH's The Shoebox blog.)



YFP 11 Diesel generator 2 x 1200 kW

# 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

## 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 elektrownia pływająca

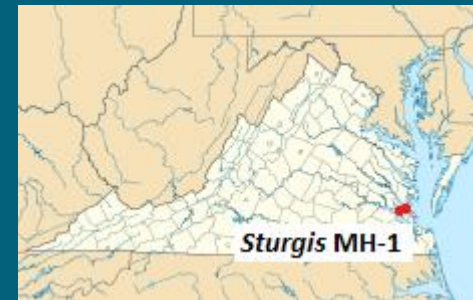
W sąsiedztwie MH-1 zacumowano w roku 1966, pierwszą pływającą elektrownią jądrową MH-1A. Elektrownię umieszczono w kadłubie statku transportowego *Sturgis* (przed zmianą przeznaczenia *SS Charles H. Cugle*) typu Liberty, produkowanego masowo w czasie II Wojny Światowej.

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.



*(P. Bloodgood/US Army Corps of Engineers)*



*(2014 by Erhard Koehler)*



*(NS SAVANNAH ASSOCIATION, INC)*



*(fot. 2016 – Captain Peter)*

# 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. Następną 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 m<sup>3</sup>/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 stoczniowego,
- 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.

- **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, spływ 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



Wizja artystyczna  
chińskiej pływającej EJ

([www.forbes.com/...china-builds-a-floating-nuclear-power-plant](http://www.forbes.com/...china-builds-a-floating-nuclear-power-plant))



Wizja artystyczna  
chińskiej pływającej EJ

[www.fornuclear.org](http://www.fornuclear.org) › Inicio )



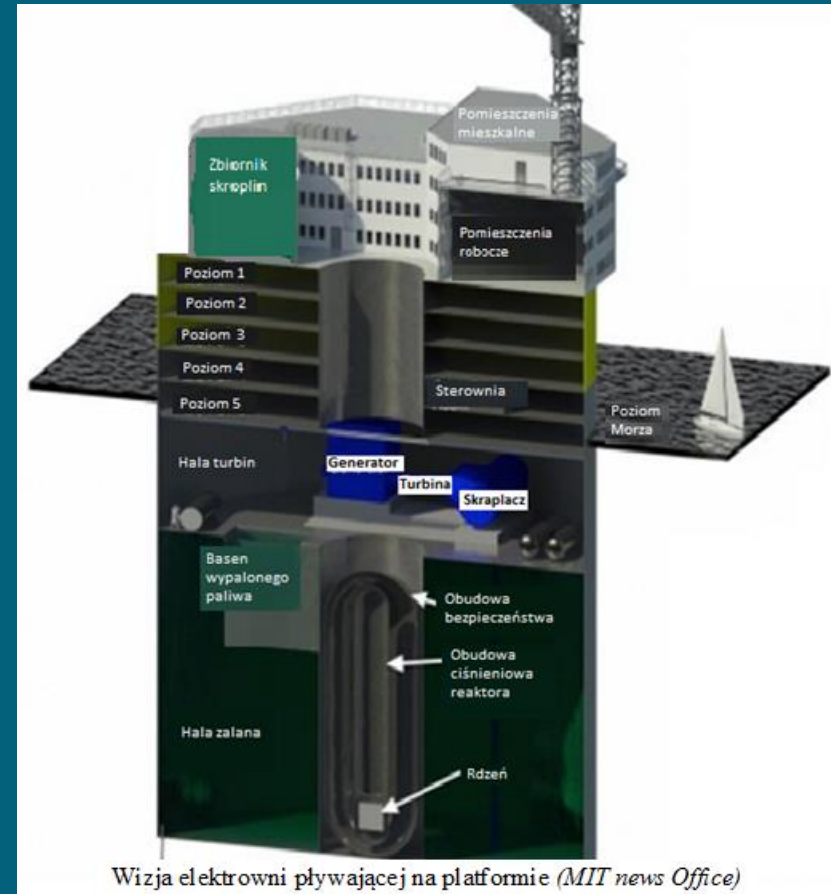
# Pływające elektrownie jądrowe

## 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.

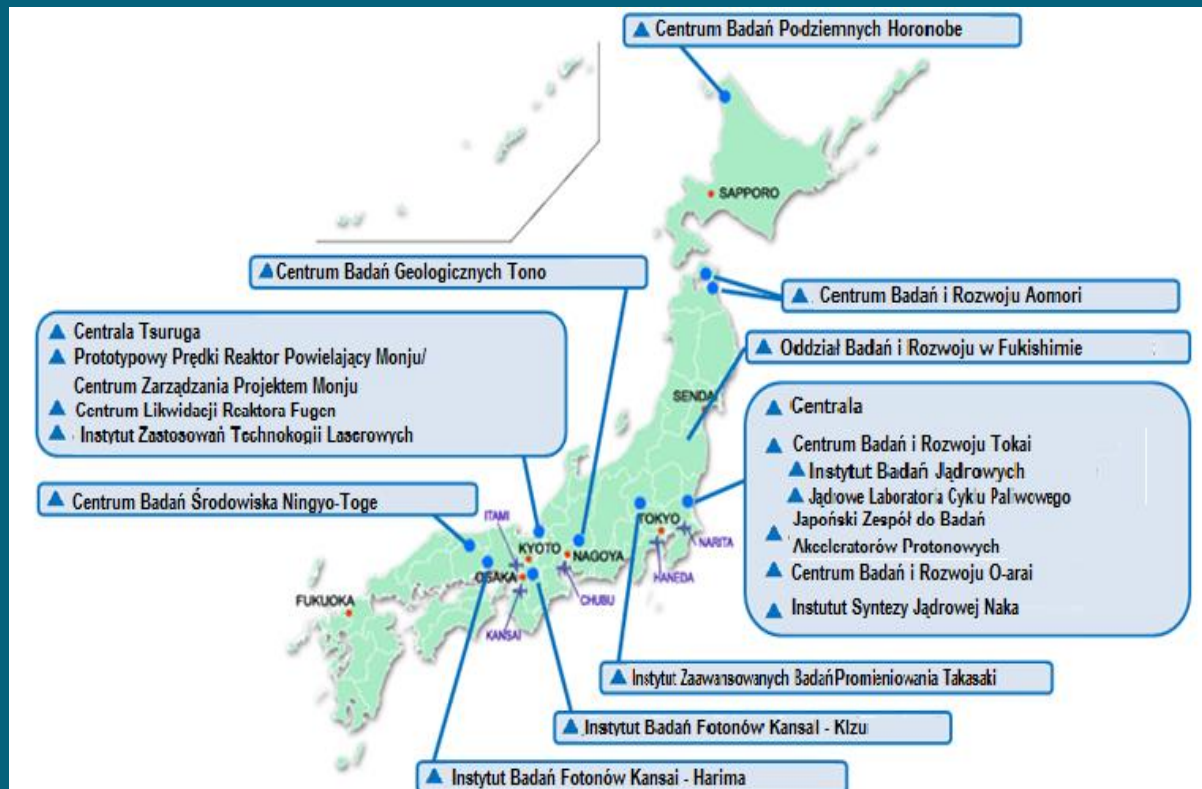
Zaletą takiego rozwiązania jest:

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

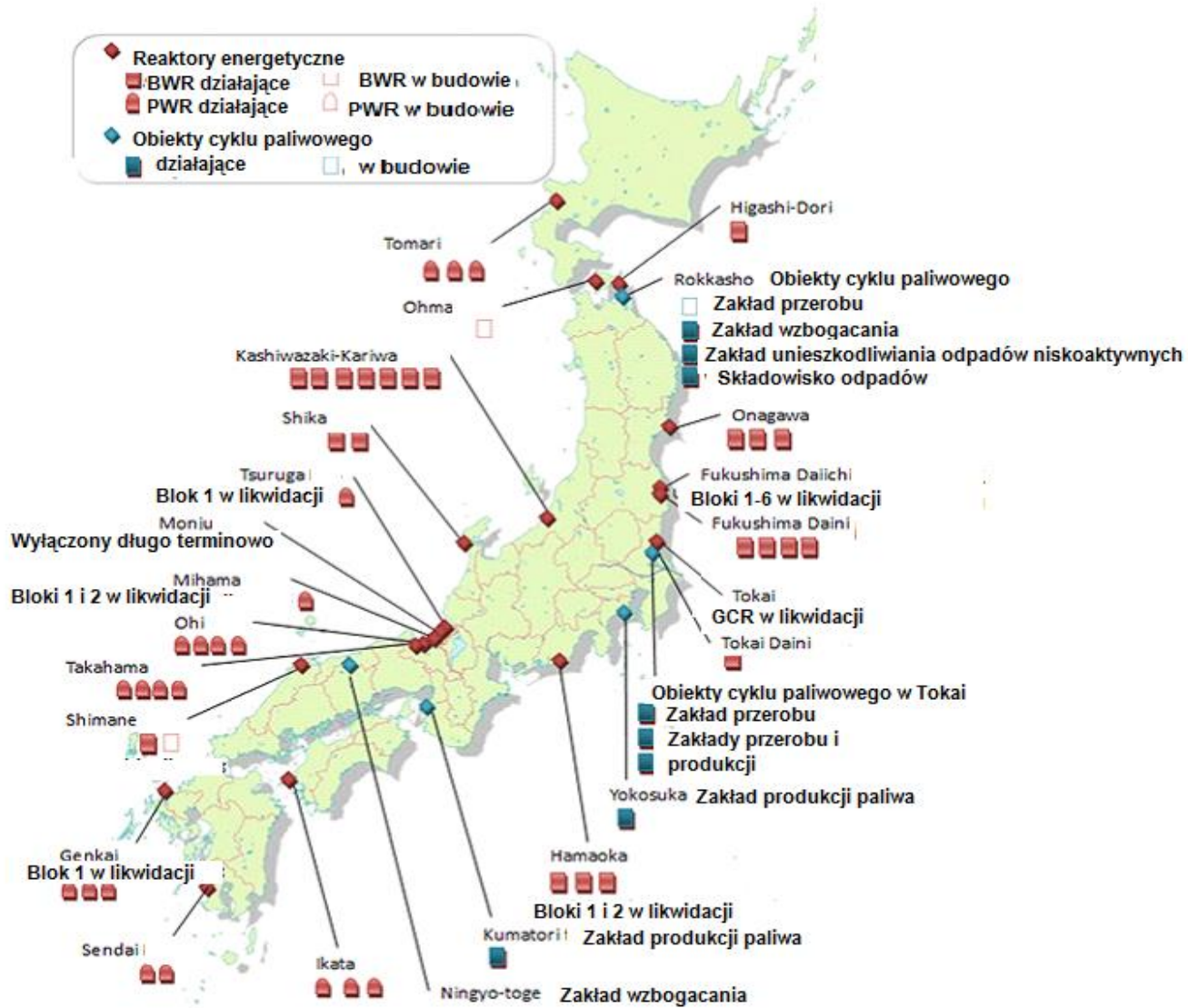


## Literatura:

- Floating Nuclear Plants for Seawater Desalination, IAEA-ITEDOC-940 1995
- KLT-40S, IAEA 2013
- MH-1A en.wikipedia.org/wiki
- Prospects of Floating Power Plants, JSC Concern Rosenergoatom, Directorate for floating nuclear power plant construction. [www.rcrusia.com.ar/espanol/cooperacion/publ.pdf](http://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-](http://www.forbes.com/.../china-builds-a-floating-nuclear-)
- Akademik Łomonosow Floating Nuclear Power Plant, [www.youtube.com/watch?v=YpZohKz5GKE](http://www.youtube.com/watch?v=YpZohKz5GKE)
- Akademik Łomonosow Floating Nuclear Power Plant, [www.youtube.com/watch](http://www.youtube.com/watch)
- Isolated Criticality. Russia's Floating Nuclear Power Plants, [www.nti.org](http://www.nti.org) › Articles
- Indonesian nuclear power proposals, Institute Nautilus for Security and Sustainability ,[nautilus.org](http://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](http://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/wik/Japanese Battle Ship Mutsu.](https://en.wikipedia.org/wik/Japanese_Battle_Ship_Mutsu)
- [www.globalsecurity.org/military/world/japan/ns-mutsu-dev.htm](http://www.globalsecurity.org/military/world/japan/ns-mutsu-dev.htm) Nuclear ship Development
- [www.worldwidescience.org/topicpages/n/nuclear+ship+mutsu.html](http://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](http://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](http://www.sozokgaku.com/fkd/en/cfen/CA100015.html)
- NS Savannah
- [www.maritime.org/tour/savannah/press/techpics.html](http://www.maritime.org/tour/savannah/press/techpics.html)
- 22. Sassa Atsuyuk, *Japan's Disastrous „Safety Muth” :Ignoring the Lessons of Minor Nuclear Incidents: Nuclear Ship Mutsu...*
- <http://www.nipon.com/en/features/co1901/>
- Grzegorz Jezierski, energia jądrowa wczoraj i dziś, NT Warszawa 2016

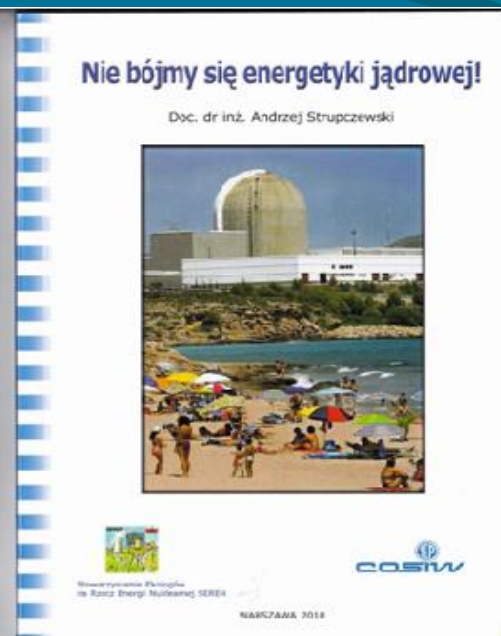
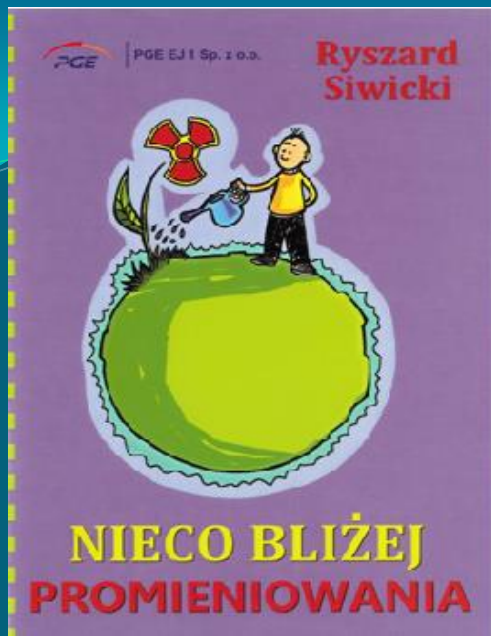


- ◆ Reaktory energetyczne
- BWR działające    □ BWR w budowie
- PWR działające    □ PWR w budowie
- ◆ Obiekty cyklu paliwowego
- działające    □ w budowie

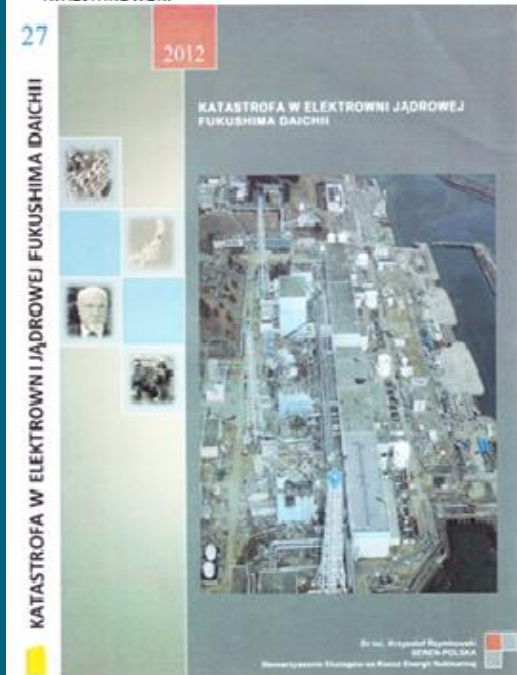
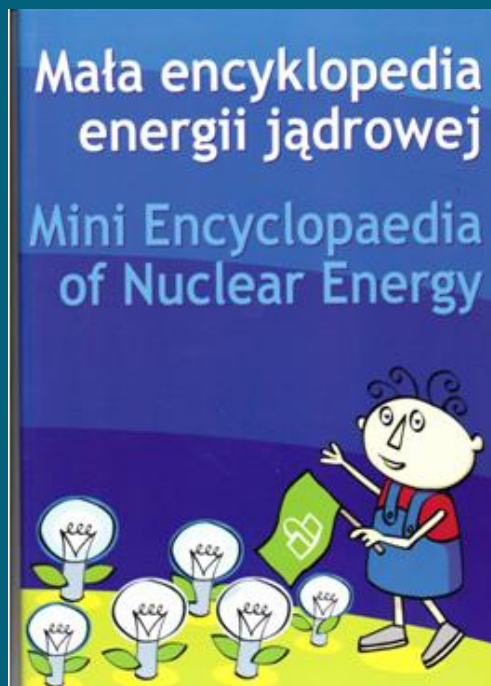


- Obiekty cyklu paliwowego
- Zakład przerobu
- Zakład wzbogacania
- Zakład unieszkodliwiania odpadów niskoaktywnych
- Składowisko odpadów

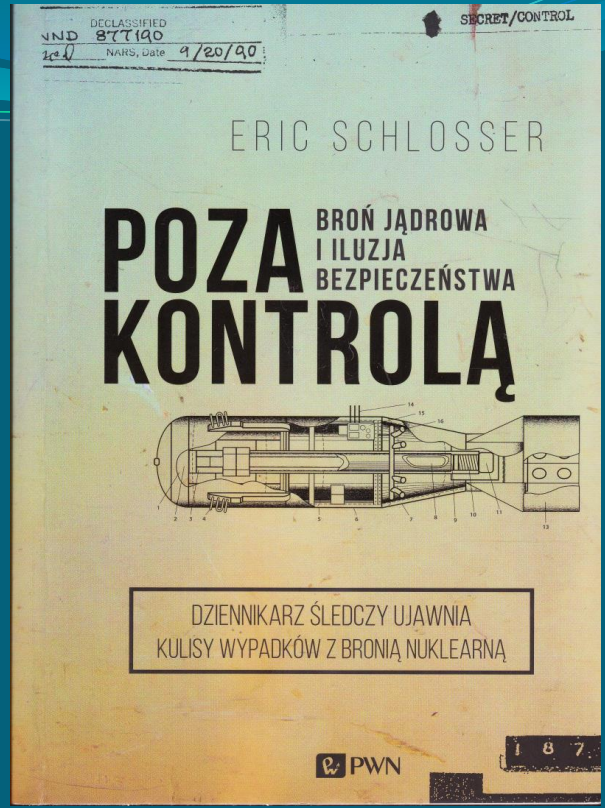
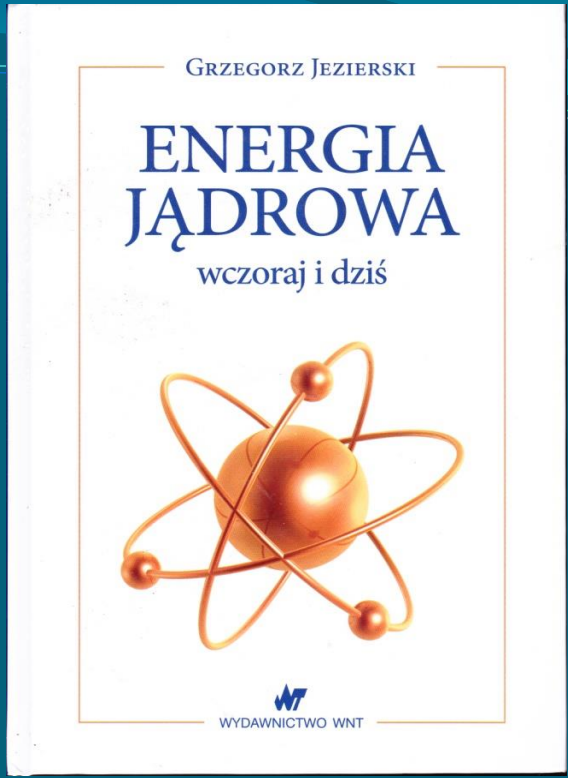
- Obiekty cyklu paliwowego w Tokai
- Zakład przerobu
- Zakłady przerobu i produkcji



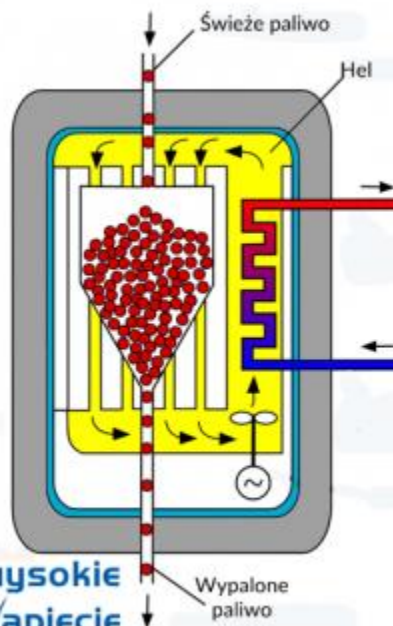
K. Rzymkowski



K. Rzymkowski



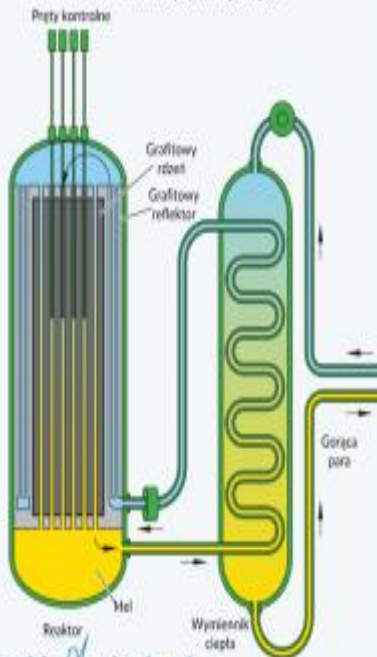
### HTR w układzie pebble bed



wysokie  
Napięcie  
.pl

Licencja:CC-BY 4.0

### HTR w układzie pryzmatycznym



wysokie  
Napięcie  
.pl

Licencja:CC-BY 4.0