



ENERGIA JĄDROWA I JEJ POKOJOWE WYKORZYSTANIE

NUCLEAR ENERGY AND ITS PEACEFUL USE

Roman JÓZWIK

Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia
Military Institute of Armament Technology

DOI 10.5604/01.3001.0010.5155

Streszczenie: Artykuł przedstawia mechanizm powstawania energii jądrowej, typy reaktorów, które obecnie są, lub mogą być budowane i wykorzystywane dla celów pokojowych oraz historię energetyki jądrowej w Polsce.

Słowa kluczowe: Energia jądrowa, reakcja łańcuchowa, reaktor jądrowy

1. Wstęp

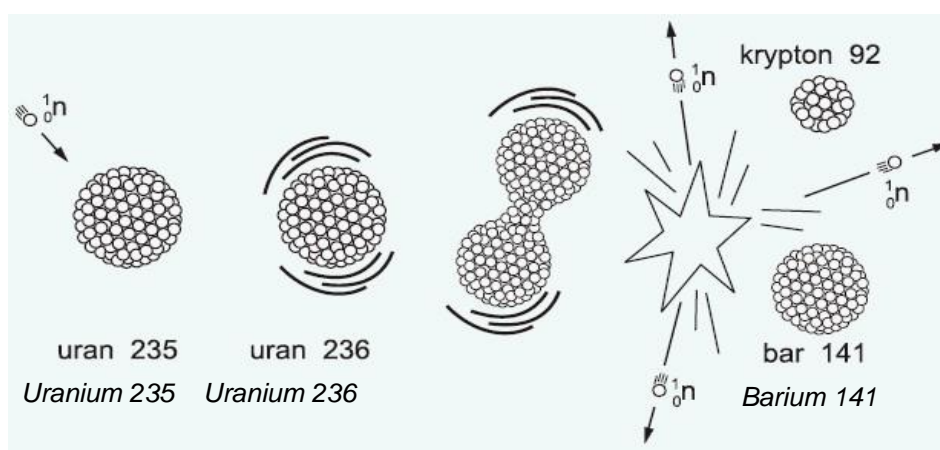
Rozszczepienie jąder atomowych to reakcja, w wyniku której z jednego ciężkiego jądra, na skutek zderzenia z neutronem, powstają dwa mniejsze jądra, które uzyskują wielką szybkość i tym samym ogromną energię kinetyczną.

Abstract: The paper presents mechanism of nuclear energy production, types of reactors, which are and could be developed and used for peaceful purposes, and foundation of nuclear energy in Poland.

Keywords: nuclear energy, chain reaction, nuclear reactor

1. Introduction

Nuclear fission is a reaction of a heavy atom nucleus hit by a neutron producing two smaller nuclei with large velocities corresponding to huge kinetic energy.



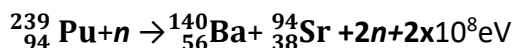
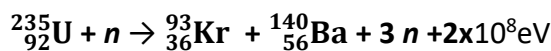
Rys. 1. Reakcja rozszczepienia uranu

Fig. 1. Uranium nuclear fission

Zjawisko to odkryli w 1938 roku Otto Hahn i Fritz Strassmann. W 1939 roku Lise Me-

The phenomenon was discovered in 1938 by Otto Hahn and Fritz Strassmann.

itner wraz ze swoim siostrzeńcem Robertem Frischem opublikowali wyniki badań (Nature, 143, 239-240), z których wynikało, że spośród pierwiastków ciężkich jedynie 2 można rozszczepić przy pomocy neutronów niskiej energii, tzw. neutronów termicznych. Są to:



Reakcjom tym towarzyszy emisja promieniowania gamma (o energii kilku MeV) oraz energia kinetyczna produktów rozszczepienia około 200 MeV. Energia ta, to energia uwolniona podczas rozpadu jednego jądra. Przy rozszczepieniu wszystkich jąder w jednym kilogramie uranu wydzieliliby się około 80 TJ, co jest równoważne eksplozji 20 000 ton trotylu.

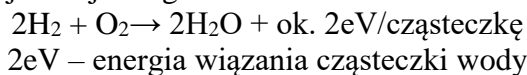
Jak wynika z przedstawionych reakcji – w procesie rozszczepienia zarówno uranu, jak i plutonu emitowany jest więcej niż jeden neutron. Dzięki temu możliwa jest reakcja łańcuchowa. Wyemitowane 2 lub 3 neutrony mogą rozszczepić 1, 2 lub 3 atomy U (Pu).

I tak w postępie geometrycznym może rozwijać się reakcja łańcuchowa. Warunkiem zajścia takiej reakcji jest stosowna objętość (masa krytyczna) materiału rozszczepialnego, aby generowane neutrony mogły trafić w kolejne jądra uranu, a nie uciekły na zewnątrz, poza obszar reakcji.

Skąd tak wielka energia? Krótko o mechanizmie jej powstawania.

Łatwiej i prościej można wyjaśnić ten problem porównując reakcje syntezy chemicznej i termojądrowej. Jako przykład syntezy chemicznej weźmy reakcję spalania wodoru. Reakcja ta realizowana jest na poziomie powłok elektronowych atomu.

Wydzielająca się na zewnątrz ENERGIA podczas spalania wodoru (widoczny płomień) - jest ENERGIĄ WIAZANIA (2 eV) powstającej cząsteczki wody. To znaczy tylko tyle, że warunkiem niezbędnym rozkładu cząsteczki wody na tlen i wodór jest dostarczenie takiej samej energii.



2eV – energia wiązania cząsteczki wody

Natomiast synteza jądrowa lub fuzja ją-

In 1939 Lise Meitner and his nephew Robert Frisch published the results of researches (Nature, 143, 239-240) showing that among the heavy elements only 2 are fissile by low energy neutrons i.e. so called thermal neutrons. They are:

These reactions are accompanied by the emission of gamma radiation (with energy of a few MeV) and the kinetic energy of fission products of ca. 200 MeV. This energy is generated at the fission of one nucleus. The nuclear fission of all nuclei included in 1 kg of uranium provides ca. 80 TJ being an equivalent of 20 000 tons of trotyl.

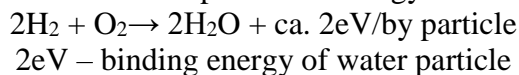
Presented reaction shows that the process of fission for both uranium and plutonium generates more than one neutron. For this reason a chain reaction is possible. The 2 or 3 emitted neutrons may cause the fission of 1, 2 or 3 atoms of U (Pu).

Then the chain reaction may develop in a geometric progression. A condition for such reaction is a suitable volume (critical mass) of fissile material to make the generated neutrons hit the consecutive nuclei of uranium instead of leaving outside beyond the zone of reaction.

What is the source of such huge energy? A few words about the mechanism of its creation.

The question may be illustrated simpler by comparing the reactions of chemical and nuclear syntheses. A reaction of hydrogen burning may be taken as an example of chemical synthesis. The reaction runs on atom electron orbits.

The ENERGY emitted outside at hydrogen burning (flame) is the BINDING ENERGY (2 eV) of created water particle. It means that a necessary condition of decomposition of water particle is the provision of the same portion of energy.



2eV – binding energy of water particle

The nuclear synthesis or fusion takes

drowa, jest to zjawisko polegające na złączeniu się dwóch lżejszych jąder w jedno cięższe.

place when two lighter nuclei combine into a heavier one.



Powstaje jądro helu, neutron i emitowana jest również energia wiązania tego jądra, która jest 10 milionów razy większa niż energia wiązania cząsteczki wody. Dlaczego?

Otóż jądra atomowe - to protony i neutrony. Protony mają dodatni ładunek elektryczny, a więc odpychają się z siłą odwrotnie proporcjonalną do kwadratu odległości.

*Elektronowolt (eV) jest to jednostka energii stosowana w fizyce jądrowej. Jeden elektronowolt to energia jaką uzyskuje, bądź traci elektron, który przemieścił się w polu elektrycznym o różnicy potencjałów jednego wolta. $1 \text{ eV} = 1e \times 1V = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$.

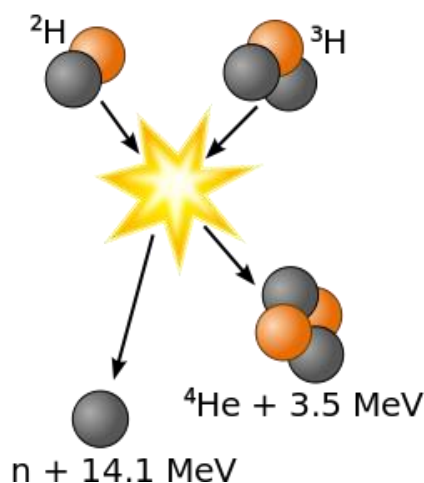
W bezpośredniej bliskości są to bardzo duże siły, więc aby doszło do powstania jądra atomowego, złożonego z 2 lub więcej protonów (rys. 2) muszą zadziałać inne siły, które są znacznie, znacznie większe od sił odpychania elektrostatycznego. Siły te nazwano siłami jądrowymi. Działają na odległościach rzędu wielkości nukleonów, tzn. 10^{-15} m .

Helium nucleus and neutron are generated together with the nucleus binding energy which is 10 million times greater than water particle binding energy. Why?

Atom nuclei consist of protons and neutrons. Protons have positive electric charge and repel each other with the force reversely proportional to the square of distance.

*Electron-volt (eV) is an energy unit used in nuclear physics. One electron-volt is the energy that an electron gets or releases by moving in the electric field at difference of potentials equal to one volt. $1 \text{ eV} = 1e \times 1V = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$

For the direct vicinity these forces are extremely high so at the creation of an atom nucleus including 2 or more protons (Fig. 2) much greater forces must act than the electrostatic repelling. These forces were called as nuclear forces. They act at distances of nuclei sizes i.e. 10^{-15} m .



Rys. 2. Schemat syntezy termojądrowej izotopów wodoru(17)

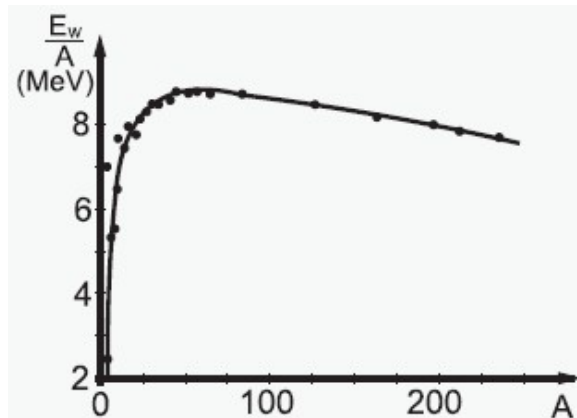
Fig. 2. Schematics of thermonuclear synthesis of hydrogen isotopes (17)

Siły jądrowe należą do oddziaływań silnych i są czwartym – znanym w fizyce, rodzajem oddziaływań. Są one kilkanaście milionów razy większe od sił tzw. oddziaływań słabych, tzn. oddziaływań elektrostatycznych,

Nuclear forces belong to strong interactions and are the fourth type of interaction known in physics. They are a dozen million times stronger than so called weak interactions like electrostatic, gravity or

grawitacyjnych, czy też magnetycznych. Stąd też wydzielająca się podczas reakcji termojądrowej energia wiązania - jest kilkanaście milionów razy większa od energii wiązania wydzielanej podczas reakcji chemicznej.

magnetic ones. For this reason the energy of fusion generated at nuclear reaction is a dozen million times greater than the energy of binding released at chemical reactions.



Rys. 3. Zależność energii wiązania przypadającej na jeden nukleon od liczby wszystkich nukleonów w jądrze

Fig. 3. Dependence of binding energy falling to one nucleon on the number of all nucleons in the nucleus

Zależność przedstawiona na rys. 3 nazwana została „najważniejszą krzywą świata”. Wynika z niej, że jądra o dużej masie (dużej liczbie nukleonów w jądrze) mają niższą energię przypadającą na jeden nukleon, niż jądra o średniej masie.

Ciężkie jądro, np. uranu o małej energii wiązania przypadającej na jeden nukleon w wyniku rozszczepienia przechodzi w dwa jądra o większej energii wiązania.

Ta różnica energii wiązania jest uzyskiwaną energią jądrową, która wykorzystywana jest zarówno do celów pokojowych, jak i wojskowych. Rozszczepienie jąder uranu U-235 zachodzące w sposób kontrolowany jest źródłem ciepła, które jest wykorzystywane w elektrowniach jądrowych. W sposób niekontrolowany rozszczepienie jąder uranu zachodzi w bombach atomowych.

2. Pokojowe wykorzystanie energii jądrowej

2.1. Reaktor jądrowy

Reaktor jądrowy jest to urządzenie służące do przeprowadzenia kontrolowanej reakcji łańcuchowej, tj. ciągłego pozyskiwania energii z rozszczepiania jąder U^{235} lub Pu^{239} . Pod-

Dependence in Fig. 3 was called the “world’s most important relation”. It shows that the nuclei with great mass (large number of nucleons in the nucleus) have a lower energy for one nucleon than the nuclei with a middle mass.

A heavy nucleus e.g. of uranium with a low energy of binding corresponding to one nucleon is transferred into two nuclei of greater energy of binding.

This difference of binding energy is a received fusion energy which is used both to peaceful and military purposes. Controlled fission of uranium U-235 nuclei provides the heat used in nuclear power stations. Uncontrolled fission of uranium nuclei takes place in atomic bombs.

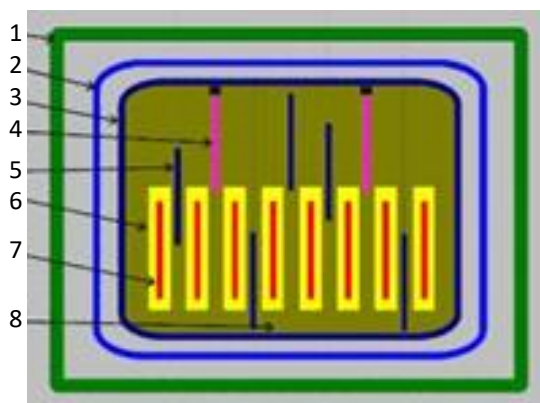
2. Peaceful Use of Nuclear Energy

2.1. Nuclear Reactor

Nuclear reactor is used to perform a controlled chain reaction i.e. continuous production of energy by the fission of U^{235} or Pu^{239} nuclei. The controlled fission reac-

stawą pracy reaktora jest kontrolowana reakcja rozszczepienia (reakcja łańcuchowa). Tylko neutron o niskiej energii (neutron termiczny) może spowodować rozszczepienie jądra uranu lub plutonu (rys. 4). Dlatego podstawowym warunkiem trwania tej reakcji (a więc działania reaktora) jest wyhamowanie rozprędzonych neutronów wyzwalanych z energią 14 MeV z jąder uranu podczas aktu rozszczepienia.

Warunkiem pracy reaktora jest obecność spowalniacza (moderatora), np.: wody lub grafitu. Okazało się, że w przypadku reaktorów wodnych jest to niezwykle ważne ze względów bezpieczeństwa. Brak wody, która jest również chłodziwem, skutkuje zatrzymaniem pracy reaktora.



tion (chain reaction) is a principle of reactor's operation. It is only by a low energy neutron (thermal neutron) that the fission of nucleus of uranium or plutonium may take place (Fig. 4). Then the basic condition for the lasting of this reaction (operation of the reactor) is the slowing down the speeding neutrons which are released from uranium nuclei with energy of 14 MeV in the process of fission.

The presence of slowing down medium (moderator) e.g. water or graphite is a condition of reactor's operation. It has proved to be very important for water reactors for the safety reasons. The lack of water which is also a cooling medium interrupts the operation of reactor.

Rys. 4. Budowa reaktora: 1) kilkumetrowa obudowa, 2) osłona ciśnieniowa, 3) reflektor neutronów, 4) pręty bezpieczeństwa, 5) pręty sterujące, 6) moderator neutronów, 7) pręty paliwowe, 8) chłodziwo

Fig. 4. Design of reactor: 1) a few metres thick covering wall (containment), 2) Pressure shield (vessel), 3) Neutron reflector, 4) Safety rods, 5) Controlling rods, 6) Neutron moderator, 7) Fuel rods, 8) Coolant

Typowy reaktor jądrowy zbudowany jest z rdzenia, reflektora neutronów oraz osłon biologicznych. Rdzeń zawiera pręty paliwowe, pręty regulacyjne, pręty bezpieczeństwa, moderator, kanały chłodzenia i kanały badawcze.

2.2. Pierwszy reaktor

Pod koniec roku 1942, pod trybunami kortów do gry w squash na Uniwersytecie w Chicago, powstał model pierwszego na świecie doświadczalnego reaktora jądrowego. Prof. Enrico Fermi przeprowadził, z użyciem tego reaktora, pierwszą kontrolowaną łańcuchową reakcję jądrową. Ponieważ ten pierwszy model nie miał ani chłodzenia ani osłon pierwsze uruchomienie przerwano po 28 min za pomocą pręta kadmowego, pochłaniającego neutrony termiczne.

Pierwszy reaktor jądrowy, który był

Typical nuclear reactor consists of a core, reflector of neutrons and biological shields. The core includes the fuel rods, controlling rods, safety rods, moderator, cooling channels and testing channels.

2.2. The First Reactor

It was by the end of 1942 that under the stands for squash game in the Chicago University a model of the first experimental nuclear reactor was built. Prof. Enrico Fermi used the reactor for the first in the world controlled nuclear chain reaction. As this first reactor was not fitted with any cooling and shielding its first operation was stopped after 28 min by a cadmium rod absorbing the neutrons.

EBR-1 (Experimental Breeder Reac-

skonstruowany nie tylko dla potrzeb eksperymentalnych - to reaktor EBR-1 (Experimental Breeder Reactor). Jego budowę rozpoczęto w maju 1949 r. w pobliżu Idaho Falls. Reaktor EBR-I przeznaczony był głównie do prowadzenia badań, m.in. dla określenia możliwości powielania paliwa jądrowego. Reaktor EBR-I pracował do 1966 r., a od czerwca 1975 r. został udostępniony do zwiedzania.

2.3. Pierwsze elektrownie jądrowe

Pierwszym na świecie doświadczalnym reaktorem, który dostarczył energię elektryczną był reaktor badawczy z paliwem plutonowym, chłodzony ciekłym metalem, zbudowany w pobliżu Idaho - USA (1952r). W 1953 r. również w Idaho uruchomiono dwa prototypy reaktorów, które do dziś są najczęściej eksploatowanymi rodzajami reaktorów, tj.; reaktorów wodno - ciśnieniowych PWR i wodno - wrzących BWR. Ten typ reaktora został zainstalowany w 1957r. w elektrowni Shippingport niedaleko Pittsburga (stan Pensylwania), czyli w 15-tą rocznicę uruchomienia pierwszego w świecie reaktora jądrowego przez Enrico Fermiego w Chicago.

W tym samym czasie w Obnińsku w Rosji powstał komercyjny, 10 MW reaktor moderowany grafitem. Reaktor ten rozpoczął komercyjne działanie w 1954 roku i był prekursorem reaktorów RBMK. Reaktor ten był eksploatowany do 29 kwietnia 2002 roku. Elektrownia w Obnińsku jest uznawana za pierwszą, niewielką, ale komercyjną elektrownię jądrową na świecie.

W kolejnych latach nastąpił burzliwy rozwój energetyki jądrowej, który został zahamowany po awariach w Three Mile Island (1979) i Czarnobylu (1986). Obecnie, z powodu wyczerpujących się surowców energetycznych oraz dużego postępu technologicznego w dziedzinie bezpieczeństwa obiektów jądrowych, energetyka jądrowa przeżywa swój renesans. Państwa posiadające już elektrownie jądrowe budują nowe, a w niektórych państwach, które zrezygnowały z tej formy pozyskiwania energii atom wraca do łask. Po takie rozwiązanie sięgają również kraje, które nigdy nie posiadały elektrowni jądrowych np. Polska.

tor) was the first that was built not exclusively for experimental purposes. Its design started near Idaho Falls in May, 1949. The EBR-I was mainly designed for research work concerning above all the reproduction of nuclear fuel. Reactor EBR-I operated until 1966 and since June, 1975 it has been available for visiting.

2.3. The First Nuclear Power Stations

A research reactor on plutonium fuel cooled by liquid metal that was built near Idaho - USA (1952) was the first experimental reactor that produced electric energy. Two prototypes of reactors i.e. pressure-water reactor (PWR) and boiling-water reactor (BWR) were also started up in Idaho in 1953 and they are commonly used up to now. Such reactor was installed in Shippingport power station near Pittsburgh in 1957 to mark the 15-th anniversary of starting by Enrico Fermi the first world nuclear reactor in Chicago.

In the same time a commercial 10 MW reactor moderated by graphite was built in Obnińsk in Russia. The reactor started commercial operation in 1954 and was a precursor of RBMK reactors. The reactor was used until 29 April, 2002. The power station in Obnińsk is acknowledged as the first still small but commercial nuclear power station in the world.

In the next years a stormy development of nuclear power industry was observed to be slowed after disastrous breakdowns in Three Mile Island (1979) and Chernobyl (1986). Recently the nuclear power industry has revived as the natural energetic resources have been reaching some limits and the technological progress on the other hand significantly increased the safety of nuclear objects. New nuclear power stations are built by the countries which have already had them whereas the other countries which earlier have resigned from this type of energy start to show again an interest in atomic energy. Some countries such as Poland which have never had any nuclear power stations also have been reaching for such solution.

The competitiveness of nuclear power in-

Konkurencyjność energetyki jądrowej wobec innych źródeł energii, a także jej praktycznie znikoma szkodliwość dla środowiska gwarantuje, że w ciągu najbliższych lat będzie się ona nadal dynamicznie rozwijać.

Historia budowy pierwszej elektrowni jądrowej w Polsce zaczęła się w sierpniu 1971 roku, kiedy to podjęto decyzję o rozpoczęciu budowy elektrowni wyposażonej w cztery reaktory o łącznej mocy 1600 MW. Jako docelowe miejsce budowy elektrowni wybrano wieś Kartoszyno nad Jeziorem Żarnowieckim. Prace postępowały szybko i sprawnie. Według oficjalnych statystyk w budowie brało udział 50 firm i ponad 6,5 tys. osób. Rozbudowywano sąsiednie miasta, aby przyjmować kolejnych pracowników. Termin uruchomienia pierwszego reaktora planowano na 1991 rok. Jednak w 1990 budowa została przerwana.

Na decyzję o nieukończeniu budowy wpływ miała tragedia w Czarnobylu, która wzbudziła gwałtowne protesty ekologów, do których dołączyły się znane osoby, m.in. Lech Wałęsa.

Oficjalne stanowisko było inne. Tadeusz Syryjczyk, minister przemysłu w rządzie Tadeusza Mazowieckiego twierdził, że Elektrownia Jądrowa Żarnowiec jest inwestycją zbędną dla polskiego systemu energetycznego w horyzoncie 20 lat. W 1990 roku (4 września) Rada Ministrów RP podjęła decyzję o zaniechaniu budowy Elektrowni Jądrowej Żarnowiec.

Po zamknięciu budowy dwa reaktory złomowano, jeden kupiła Finlandia - gdzie bezawaryjnie służy do dziś, czwarty trafił do węgierskiego centrum szkoleniowego. W miejscu niedoszłej elektrowni pozostał ogromny, obejmujący kilkaset hektarów niedokończony plac budowy. Straty – to kilka miliardów złotych.

3. Typy reaktorów stosowanych w energetyce jądrowej

3.1. Reaktory typu PWR

Reaktor PWR – pressurized water reactor – (reaktor wodno-ciśnieniowy - 65% reaktorów na świecie) składa się z dwóch głównych

dustry against other sources of energy and also its practical harmlessness to the environment is a warrant of its future dynamical progress.

The story of building the first Polish nuclear power station starts in August, 1971 when a decision was made to build the power station with four reactors of total power up to 1600 MW. Kartoszyno village at Żarnowiec Lake was pointed as a site for the power station. The works progressed efficiently and rapidly. According to official statistics 50 firms and more than 6.5 thousand personnel were involved in the construction work. The neighbouring towns had been developed to engage new workers. The first reactor was planned to start out in 1991. But in 1990 the construction was halted.

Decision on stopping the construction was influenced by the Chernobyl disaster as intense protests of ecologists accompanied by public persons such as Lech Wałęsa had started.

An official position was a bit different. Mr Tadeusz Syryjczyk the minister of industry in Tadeusz Mazowiecki government claimed that the Żarnowiec Nuclear Power Station is a redundant investment for the Polish power industry in 20 years perspective. The Board of Ministers of the Republic of Poland stopped the construction of the Żarnowiec Nuclear Power Station by decision made on 04 September, 1990.

After closing the construction site two reactors were scrapped, one was bought by Finland where it operates without any malfunctions up to now and the forth went to the Hungarian training centre. In the place of would-be power station an immense unfinished construction site was left in the area of a few hundred hectares. The losses count a few billion zloty.

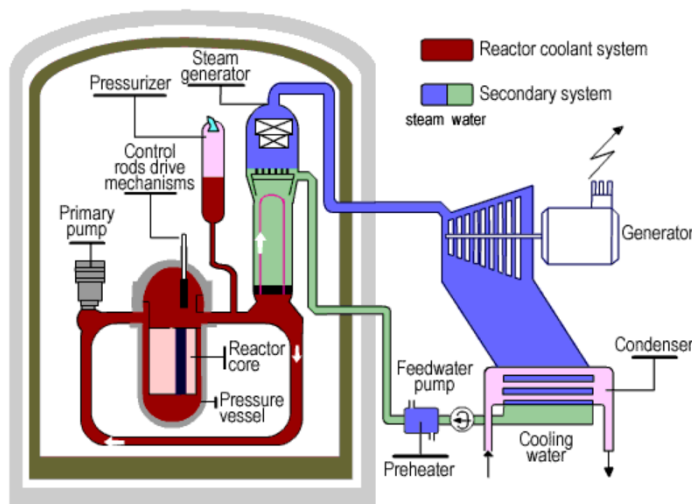
3. Types of Reactors Used in Nuclear Power Industry

3.1. PWR Reactors

PWR – pressurized water reactor (65% reactors in the world) consists of two main cooling systems: a primary and sec-

obiegów chłodzących: pierwotnego i wtórne-
go. Obieg pierwotny jest to obieg, w którym
chłodziwo, w tym wypadku woda, podgrze-
wana jest do wysokiej temperatury w wyso-
kim ciśnieniu i krąży w obiegu zamkniętym
pomiędzy rdzeniem, a wytwornicą pary - ko-
lor czerwony na rys. 5.

W wytwornicy energia jest przekazywana
do obiegu wtórnego, w którym następuje
zmiana wody w parę już przy niższym ciśnie-
niu - kolor zielony i niebieski na rys. 5. Para
z obiegu wtórnego jest przekazywana na tur-
binę gdzie rozprężając się wprawia w ruch ło-
patki turbiny, ta zaś jest połączona za pomocą
wału z generatorem elektrycznym, produkując
w ten sposób energię elektryczną (generacja
ok. 5.000, - ton pary wodnej/godz. w reaktor-
ze 1000 MW).



Rys. 5. Schemat reaktora typu PWR

Fig. 5. Scheme of PWR reactor

ondary. In the primary circulation a cool-
ant, water in this case, is heated to high
temperature under the high pressure and
flows in the closed system between the
core and the steam generator – red colour
in Fig. 5.

In the steam generator the energy is
transferred to the secondary system where
the transition of water into the steam
takes place at a lower pressure – green
and blue colours in Fig. 5. The steam of
the secondary circulation is fed to a tur-
bine where it depressurises and puts into
motion the blades of turbine which is
connected by a shaft to the electric gener-
ator and finally it produces the electric
energy (generating ca. 5 000 tons of water
steam per hour in 1000 MW reactor).

Water – woda

Secondary system – system obiegu wtórnego
Reactor coolant system – system chłodzenia
reaktora

Reaktor core – rdzeń reaktora

Pressure Vessel – obudowa ciśnieniowa

Primary pump – pompa obiegu pierwotnego

Control rods drive mechanisms – mechani-
zmy napędu prętów sterujących

Pressuriser – wytwornica ciśnienia

Steam generator – wytwornica pary

Generator – generator

Feedwater pump – pompa zasilająca w wodę

Preheater – podgrzewacz

Cooling water – woda chłodząca

Condenser – skraplacz

Steam – para

3.2. Reaktor BWR

W reaktorze typu BWR- Boiling Water
Reactor (reaktor wodno-wrzący), około 25%
reaktorów na świecie, woda jest ogrzewana
w rdzeniu poprzez odbiór ciepła z prętów pa-
liwowych na tyle mocno, że zaczyna wrzeć
a następnie parować. Wytworzona mieszanina
parowo-wodna trafia do osuszaczy pary i po-
przez rurociąg parowy kierowana jest do tur-
biny (rys. 6).

W porównaniu do reaktora typu PWR
budowa reaktora typu BWR jest prostsza, gdyż
nie ma odrębnych wytwornic pary i rurocią-

3.2. BWR Reactor

The BWR-Boiling Water Reactor
contributes to ca. 25% of world's reac-
tors where the water is heated so inten-
sively in the core by fuel rods that it
boils and evaporates. A steam-water
mixture is directed to steam driers and
next through the system of pipes to the
turbine (Fig.6).

The design of BWR reactor is simpler
than PWR reactor as no separate genera-
tors of steam and primary circulation
pipe system are needed. There is also no

gów obiegu pierwotnego. Nie ma również potrzeby by zapobiegać wrzeniu wody.

Wadą jednoobiegowego reaktora typu BWR jest to, że para wodna i woda, przepływając przez wszystkie elementy elektrowni, są lekko aktywowane i zanieczyszczone izotopami promieniotwórczymi. Wszelkie urządzenia i części bloku jądrowego muszą, więc posiadać dodatkowe osłony.

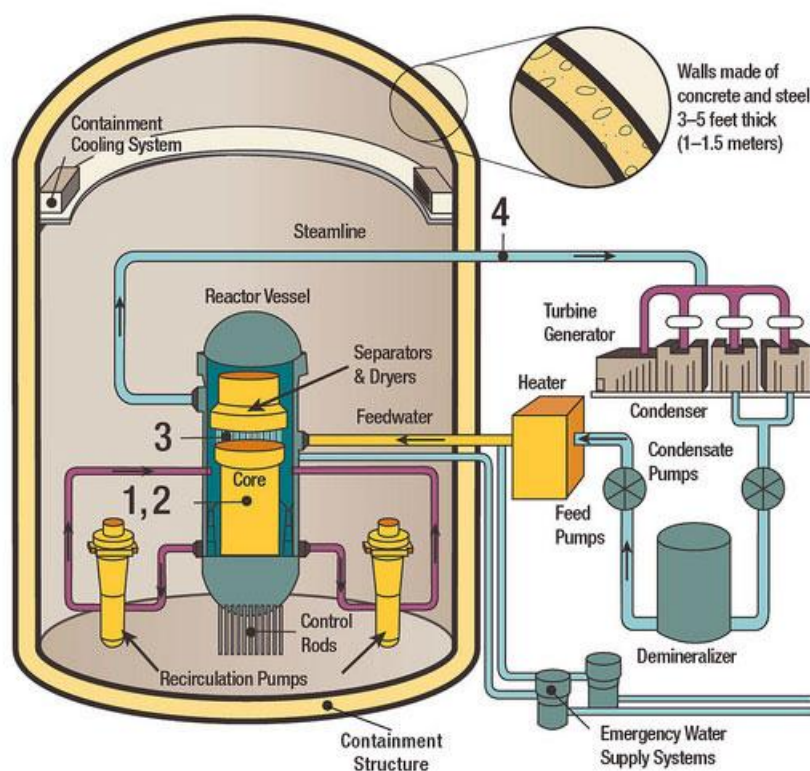
Na dzień 31 grudnia 2015 r., na świecie czynnych było 439 bloków jądrowych o sumarycznej mocy 382,5 GW, w budowie znajdowało się 66 bloków jądrowych o całkowitej mocy projektowej 70,3 GW.

need to prevent the water boiling.

A drawback of one circulation BWR reactor is that the water and its steam flowing through all systems of power plant are a bit activated and polluted by radioactive isotopes. Then all equipment and parts of nuclear block have to have additional shields.

439 nuclear blocks were operating in the world on 31 December, 2015 providing totally 382.5 GW and 66 blocks were under construction for planned total power of 70.3 GW.

In 2015 the nuclear power plants sup-



Rys. 6. Schemat reaktora typu BWR [16] (Boiling Water Reactor)

Fig. 6. Scheme of BWR [16] reactor (Boiling Water Reactor)

Containment Structure – struktura obudowy, Recirculation Pumps – pompy recykuracyjne, Control Rods – pręty kontrolne, Core – rdzeń, Feedwater – zasilanie w wodę, Separators and Dryres – separatory i suszarki, Reactor Vessel – obudowa reaktora, Steamline – przewód (rura) parowy, Containment Cooling System – system chłodzenia obudowy, Walls made of concrete and steel 3-5 feet thick (1-1.5 meters) – ściany żelbetonowe o grubości 1-1,5 m), Turbine Generator – turbina generatora, Heater - podgrzewacz, Condenser – skraplacz, Condensate Pumps – pompy kondensatu, Feed Pumps – pompy zasilające, Demineralizer - demineralizator, Emergency Water Supply Systems – awaryjny systemy zasilania w wodę

W 2015 r. produkcja energii elektrycznej w elektrowniach jądrowych wynosiła 2500 TWh, co stanowiło 15 - 17% całkowitej pro-

duced 2500 TWh of electric energy what corresponds to 15 - 17% total world production of electric energy.

dukcji energii elektrycznej na świecie. Procentowy udział energii jądrowej w produkcji krajowej mają: Litwa - 80%; Francja -70% Belgia - 60%; Bułgaria, Węgry, Czechy, Słowacja, Szwecja – ok. 40% [17].

3.3. Problematyka energetyki jądrowej w Polsce

Do kompetencji ministra właściwego do spraw energii, zgodnie z art. 7a ust. 2 pkt 2 Ustawy z dnia 4 września 1997 o działach administracji rządowej, należą sprawy związane z wykorzystaniem energii atomowej do potrzeb społeczno-gospodarczych kraju.

13 stycznia 2009 r. Rada Ministrów przyjęła uchwałę o rozpoczęciu prac nad Programem Polskiej Energetyki Jądrowej oraz o powołaniu Pełnomocnika Rządu ds. Polskiej Energetyki Jądrowej. Celem programu jest uruchomienie pierwszej elektrowni jądrowej w roku 2020. PGE Polska Grupa Energetyczna S.A. jest przewidziana, jako główny inwestor.

W lipcu 2009 r. Ministerstwo Gospodarki opublikowało *Ramowy harmonogram działań dla energetyki jądrowej*.

Rada Ministrów podjęła uchwałę w sprawie Programu Polskiej Energetyki Jądrowej (PPEJ) przygotowanego przez Ministra Gospodarki. W Programie zapisano zakres działań, jakie należy podjąć, aby bezpiecznie korzystać z energetyki jądrowej w Polsce.

Program przewiduje prowadzenie działań w 5 etapach:

Etap I - do 31.12.2013: stworzenie podstaw instytucjonalnych i programowych do rozwoju energetyki jądrowej; uchwalenie i wejście w życie przepisów prawnych niezbędnych dla rozwoju i funkcjonowania energetyki jądrowej.

Etap II - 1.01.2014 - 31.12.2016: ustalenie lokalizacji i zawarcie kontraktu na wybraną technologię pierwszej elektrowni jądrowej.

Etap III - 1.01.2017 - 31.12.2018: wykonanie projektu technicznego i uzyskanie wszystkich wymaganych prawem decyzji i opinii.

Etap IV - 1.01.2019 - 31.12.2024: pozwolenie na budowę, budowa i podłączenie do sieci pierwszego bloku pierwszej elektrowni ją-

Below are some countries with high percentage of nuclear power plants: Lithuania-80%, France-70%, Belgium-60%, Bulgaria, Hungary, Czech Republic, Slovakia, Sweden – ca. 40% [17].

3.3. Question of Nuclear Energy in Poland

According to article 7a, pos. 2, clause 2 of the Law accepted on 04 September, 1997 and concerning the divisions of government administration the use of atomic energy for public-economic needs of the country falls into the competence of minister relevant to energy affairs.

The Board of Ministers made the decision on 13 January, 2009 about launching the works on the Polish Nuclear Energy Program and calling a Government Commissioner for the Polish Nuclear Energy. The aim is to start the first nuclear power plant in 2020. The Polish Energy Group (PGE) S.A. is planned to be a main investor.

The Ministry of Economy published the *Frame Schedule of Activities for Nuclear Energetic Industry* in July, 2009.

The Board of Ministers has accepted the decision prepared by the Minister of Economy on the Polish Nuclear Energy Program (PNEP). The Program includes a list of activities securing the safe use of nuclear energy in Poland.

The Program predicts 5 stages of actions:

Stage I – up to 31.12.2013: establishing institutional and program grounds for development of nuclear energy; acceptance and implementation of legal regulations needed for development and functioning of the nuclear power industry.

Stage II - 1.01.2014 - 31.12.2016: setting the localisation and concluding a contract for a selected technology of the first nuclear power station.

Stage III - 1.01.2017 - 31.12.2018: preparing technical design and obtaining all decisions and opinions required by the law.

Stage IV - 1.01.2019 - 31.12.2024: permission for construction, construction and connection of the first block of the first nuclear

drowej, rozpoczęcie budowy kolejnych bloków/elektrowni jądrowych.

Etap V - 1.01.2025 - 31.12.2030: kontynuacja i rozpoczęcie budowy kolejnych bloków/elektrowni jądrowych. Zakończenie budowy pierwszej elektrowni jądrowej. Zakończenie budowy drugiej elektrowni jądrowej przewidywane było na 2035 rok.

W zasadzie pierwszy etap został zrealizowany. Znowelizowano Ustawę „Prawo atomowe” z 2000 roku oraz wydano stosowne rozporządzenia do realizacji dalszych etapów Programu. W drugim etapie sformułowano jedynie wymagania dotyczące lokalizacji elektrowni.

3.4. Wypadki [9]

W 60-letniej historii eksploatacji elektrowni jądrowych na świecie było ich kilkanaście. Oprócz 2 najgroźniejszych - w żadnym z nich nikt nie stracił zdrowia i życia. Te 2 najgroźniejsze – to Czarnobyl i Fukushima. (Czarnobyl – moc wzrosła 1000 razy).

Błędy obsługi podczas wygaszania jednego z bloków EJ w Czarnobylu były powodem jednej z największych katastrof jądrowych na świecie. Wydarzyła się ona 26 kwietnia 1986r., kiedy to wybuch i stopienie prętów paliwowych reaktora spowodowały śmierć 31 osób, oraz wymusiły ewakuację 300 000 mieszkańców. Radioaktywna chmura przemieszczała się po całej Europie. Częściowa jedynie likwidacja skutków kosztowała 6,7 mld. USD.

Na skutek trzęsienia ziemi, tsunami oraz awarii systemów chłodzenia w elektrowni jądrowej Fukushima I, a także problemów w innych jednostkach nuklearnych - 11 marca 2011 r. w Japonii ogłoszono stan zagrożenia nuklearnego. Ewakuowano 140 tysięcy osób zamieszkałych w obrębie 20 km od elektrowni.

4. Bezpieczeństwo w energetyce jądrowej

4.1. Źródła zagrożenia

Źródłem potencjalnego zagrożenia w energetyce jądrowej jest możliwość uwolnienia substancji promieniotwórczych oraz brak

power plant to the grid, launching construction of next nuclear blocks/plants.

Stage V - 1.01.2025 - 31.12.2030: continuation and starting the construction of next nuclear blocks/plants. Termination of construction of the first nuclear plant. Termination of the second nuclear plant construction was planned in 2035.

Formally the first stage was completed. The Law “Atom Regulations” from 2000 was updated and the relevant Decisions were issued to secure the performance of next stages of the Program. In the second stage only requirements concerning the localisation of the electric plant were formulated.

3.4. Accidents [9]

Around dozen accidents have happened in the world for 60-yeras of nuclear power station use. Apart of two the most dangerous no one has lost the life or health. The two the most dangerous refer to Chernobyl and Fukushima. (In Chernobyl the power increased by 1000 times).

The errors of personnel at switching off one of plant’s blocks in Chernobyl caused one of the greatest nuclear disasters in the world. It happened on 26 April, 1986 when the explosion and melting of reactor’s fuel rods caused 31 fatalities and enforced the evacuation of 300 000 residents. A radioactive cloud has cruised through the Europe. Only partial cost of settling damages was USD 6.7 billion.

The earth quake and tsunami wave combined with a failure of cooling systems in nuclear power plant in Fukushima I in Japan and problems existing in other nuclear units caused that on 11 March, 2011 the state of nuclear emergency was declared. 140 thousand citizens living within the radius of 20 km from the power plant were evacuated.

4. Safety in Nuclear Energetic Industry

4.1. Sources of Threats

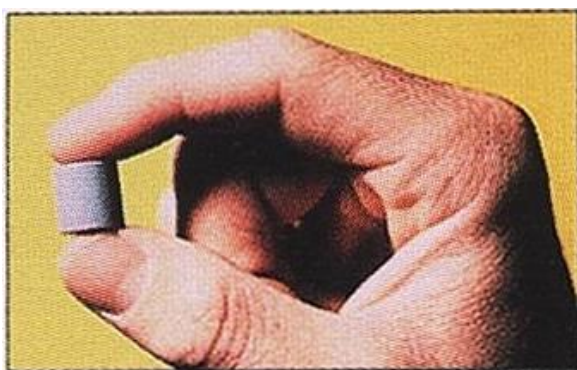
A potential threat in nuclear energetic industry is caused by a possible release of radioactive substances and the lack of ca-

możliwości odebrania ciepła powyłączeniowego, powodujący zniszczenie prętów paliwowych ze wszystkimi tego konsekwencjami.

Substancje promieniotwórcze w rdzeniu i chłodziwie reaktora PWR-1000 - to:

- rdzeń: $3,7 \cdot 10^{20}$ Bq ($1,1 \times 10^{10}$ Ci), gdzie powstaje ponad 200 nuklidów. Są to produkty rozszczepienia, głównie transuranowce takie jak: Kr, Xe, J, Br, Cs, Rb, Sr, Ba, Se.

- woda obiegu pierwotnego: $1,1 \times 10^{15}$ Bq (3×10^4 Ci), posiadająca gazowe produkty rozszczepienia (Kr, Xe, J).



capacities for reception of the heat after switching off what causes the destruction of fuel rods with all consequences of it.

Following radioactive materials are in PWR-1000 reactor core and coolant:

- Core: $3,7 \cdot 10^{20}$ Bq ($1,1 \times 10^{10}$ Ci), where more than 200 nuclides is generated. They are the products of fission (in general trans-uranium) such as: Kr, Xe, J, Br, Cs, Rb, Sr, Ba, Se.

- Water in primary circulation: $1,1 \times 10^{15}$ Bq (3×10^4 Ci) including the gaseous products of fission (Kr, Xe, J).

Rys. 7. Pastyłka paliwowa (UO₂)

Fig. 7. A bit of fuel (UO₂)

Pastyłki paliwowe w obudowie (koszulce) wypełnionej helmem, dla lepszej wymiany ciepła – to pręty paliwowe, natomiast kilkadziesiąt prętów paliwowych w obudowie – to kasetka paliwowa. Między prętami paliwowymi przepływa chłodziwo i moderator (w większości reaktorów jest to woda).

Należy podkreślić, że uwolnienie do atmosfery już 10^3 Ci może spowodować otrzymanie maksymalnych dawek niebezpiecznych dla zdrowia w odległości 1 km od elektrowni, nie mówiąc o aktywnościach powstających w rdzeniu, które są 10 milionów razy większe.

4.2. Podstawowe zasady i środki zapewnienia bezpieczeństwa w energetyce jądrowej

4.2.1. Elementy konstrukcji reaktora – bariery bezpieczeństwa:

Wszystkie działające konstrukcje stosują tzw. „Strategię obrony w głąb”.

Kilka kolejnych poziomów obrony (bezpieczeństwa) działa tak, że jeśli zawiedzie je-

Fuel bits in a jacket filled with helium for better exchange of heat create a fuel rod and a few dozen of fuel rods in a casing make the fuel cassette. The coolant and moderator circulate between the fuel rods (it is the water in most of reactors).

It has to be noted that even the release of 10^3 Ci to the atmosphere may expose to maximal doses dangerous for health at distance of 1 km from the power plant. The levels of radioactivity generated in the core are 10 million times greater.

4.2. Basic Rules and Means Assuring the Safety in Nuclear Energetic Industry

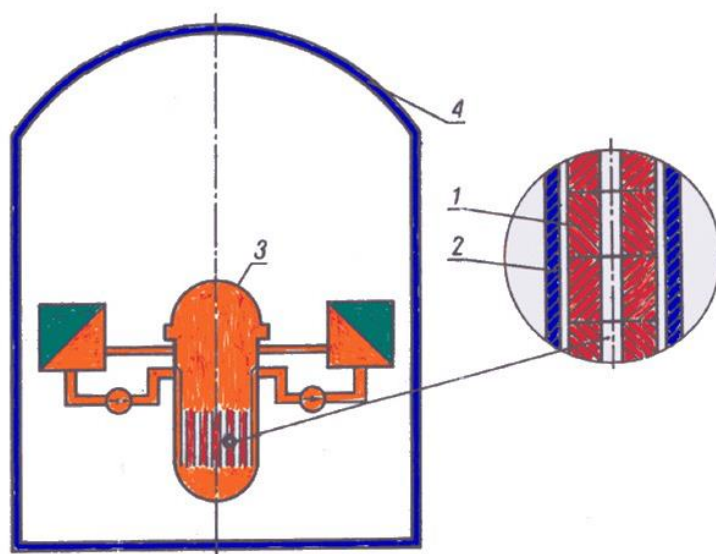
4.2.1. Components of Reactor's Design – Barriers of Safety

All operating designs use a strategy that is called “a deep defence”.

A few consecutive levels of defence (safety) are established to activate the next

den działa następny. To jest tak, jak w średniowiecznym zamku: rów, fosa, pułapki, fosa i wysoki mur obronny. Pierwszym poziomem zapewnienia bezpieczeństwa jest układ kolejnych barier ochronnych. Reaktor jądrowy jest skonstruowany tak, aby powstające produkty rozszczepienia gromadzone były w tzw. rdzeniu reaktora (pastylkach paliwowych). Rdzeń reaktora oddzielony jest od środowiska systemem 4 elementów ochronnych (rys. 8).

level if a one fails. It works similarly as in a medieval castle: a ditch, a moat, traps and high defending wall. A system of consecutive protecting barriers provides the first level of safety. Nuclear reactor is so designed to secure that the products of fission are collected within so called reactor's core (fuel bits). The core of reactor is separated from the environment by a system of 4 protecting elements (Fig. 8).



Rys. 8. System barier ochronnych – izolujących substancje promieniotwórcze od otoczenia (12): 1) pastylki paliwowe (zatrzymują ~99% aktywności produktów rozszczepienia), 2) koszulka pręta paliwowego, 3) obudowa ciśnieniowa układu chłodzenia reaktora, 4) obudowa bezpieczeństwa.

Fig. 8. System of protecting barriers separating the radioactive substances from the environment (12): 1) fuel bits (they arrest ~99% of radioactive products of fission), 2) jacket of the fuel rod, 3) pressure containment of reactor's cooling system, 4) safety containment.

Należy podkreślić, że obudowa bezpieczeństwa reaktora oprócz funkcji izolacji substancji promieniotwórczych od otoczenia, chroni również przed skutkami zdarzeń zewnętrznych, takich jak: uderzenie samolotu lub eksplozja chemiczna. Konstrukcja obudowy, o grubości nawet kilku metrów, musi wytrzymać wysokie ciśnienie awaryjne. Zwykle zbudowana jest ze sprężonego żelbetu z wykładziną stalową jedno lub – kilku powłokową.

The important thing is that reactor's external containment protects both against releasing the radioactive material to the environment and against external threats such as impact of a plane or chemical explosion. The structure of the containment has a thickness up to a few metres as it has to withstand a high emergency pressure. It is usually built of reinforced concrete with steel lining consisting of one or a few layers.

4.2.2. Środki techniczne - stabilność i samo-regulacja reaktora

Reaktor musi mieć wbudowane układy ujemnego sprzężenia zwrotnego ograniczające w sposób bezpieczny znaczny wzrost reaktywności, a zatem generowanej mocy reaktora. Układy te powodują natychmiastowe przejście reaktora w stan podkrytyczny (reaktywność jest to parametr fizyczny określający bilans neutronów w reaktorze). Nagły wzrost mocy

4.2.2. Technical Means – Reactor's Stability and Self-regulation

The reactor has to be equipped with the systems of negative feedback limiting in a safe way the surges of reactivity (reactivity is a physical parameter describing the balance of neutrons in reactor) corresponding to generated power. These systems make the reactor immediately pass into a subcritical status. A surge of power causes the

powoduje wprowadzenie lub zrzut prętów bezpieczeństwa (np. kadm, bor), które skutecznie pochłaniając neutrony termiczne powodują obniżenie reaktywności, a zatem obniżenie mocy reaktora, aż do wygaszenia włącznie. Pompy wodne (pompy awaryjne) muszą zapewniać niezawodne i szybkie odprowadzenie ciepła powyłączeniowego.

Reaktory wodne, gdzie woda spełnia rolę zarówno chłodziwa, jak i moderatora (spowalnicza neutronów), są z natury bardziej bezpieczne od innych typów reaktorów np.: grafitowych (Czarnobyl). Utrata wody, a zatem utrata moderatora przerywa pracę reaktora, bowiem brak jest neutronów termicznych, niezbędnych do realizacji procesu rozszczepienia.

Istotną rolę spełniają układy awaryjnego chłodzenia rdzenia (UACR). Układy te dostarczają wodę (przeważnie borowaną) i zalewają rdzeń w razie ewentualnej awarii, (np. utraty chłodziwa w obiegu pierwotnym). Tym samym skutecznie zapewniają odprowadzenie ciepła powyłączeniowego. Układy te są zasilane z awaryjnych generatorów, bądź akumulatorów.

Każdy reaktor musi posiadać niezawodne, awaryjne zasilane (sieć, agregaty prądotwórcze i akumulatory).

Istotne znaczenie mają również rygorystyczne wymagania dla projektu i wyposażenia reaktora, zapewniające tym samym niezawodność elementów ważnych dla bezpieczeństwa elektrowni jądrowej. Priorytetowo traktuje się zapewnienie jakości na etapach: projektowania, budowy, rozruchu i eksploatacji elektrowni.

4.2.3. Środki organizacyjne

PAA jest państwowym organem regulacyjno - kontrolnym i jako „dozór jądrowy” – jest niezależny od właścicieli nadzorowanych obiektów jądrowych. Prezes PAA jest wyposażony w odpowiednie uprawnienia, wykwalifikowany personel oraz środki finansowe i techniczne odpowiednie do zakresu działalności.

Wszystkie obiekty jądrowe wymagają rygorystycznego systemu nadzoru państwowego i dozorowego. System obejmuje: zezwolenia; certyfikację przedsiębiorstw, certyfikację pracowników i procedur oraz odbiory i inspekcje

safety rods (e.g. cadmium, boron) which efficiently absorb thermal neutrons are pushed into or dropped to reduce reactor's reactivity and power until the switching off. Water pumps (emergency pumps) have to secure a reliable and rapid taking the heat away after the switching off.

Water reactors where the water is both the coolant and moderator (slowing down the neutrons) are by the mere nature safer than other reactors e.g. graphite reactors (Chernobyl). Any loss of water, and in effect the moderator, interrupts the operation of the reactor as thermal neutrons needed for the process of fission are missing.

Core emergency cooling systems (CECS) have a significant meaning. These systems provide the water (usually borated water) and flood the core in emergency cases (e.g. at any losses of the cooler in the primary circulation). In this way they effectively take the heat away after switching off. The systems are powered by emergency generators or batteries.

Each reactor has to have a reliable emergency source of power (mains, electric generators and batteries).

Strict requirements for the design and equipment of the reactor also have essential meaning in providing the reliability of components which are crucial for the safety of nuclear power plant. Quality assurance on the stages of designing, construction, starting up and using the power plant is the first priority.

4.2.3. Organisational Steps

The PAA is a state regulating-monitoring body and as a “nuclear survey” is independent on the owners of surveyed nuclear objects. The PAA chairman has all entitlements and qualified personnel and financial and technical assets relevant to the activities he undertakes.

All nuclear objects require a strict system of state survey and monitoring. The system includes: licenses, certification of companies, certification of employees and procedures, and the acceptations and inspections of plants. The whole system has to consider

przedsiębiorstw. Cały system musi uwzględniać postanowienia: ustawy „Prawo atomowe”, rozporządzeń RM i rozporządzeń Prezesa PAA. Ponadto system musi również spełniać kryteria i wymagania bezpieczeństwa MAEA (Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej).

Za zapewnienie bezpieczeństwa niezbywalną i całkowitą odpowiedzialność ponoszą posiadacze zezwoleń na prowadzenie działalności z obiektami jądrowymi, czyli właściciele tych obiektów.

Po awarii elektrowni w Czarnobylu powstało Światowe Stowarzyszenie Operatorów Jądrowych (WANO) (World Association of Nuclear Operators). Zadaniem WANO jest maksymalne zwiększenie bezpieczeństwa i niezawodności funkcjonowania elektrowni jądrowych. Stowarzyszenie prowadzi ciągłą wymianę informacji między operatorami elektrowni oraz realizuje programy przeglądu elektrowni przez niezależnych ekspertów, organizuje kursy, warsztaty i seminaria.

Istotnym wydarzeniem okazało się również przyjęcie dwóch międzynarodowych konwencji: jednej dotyczącej wczesnego powiadamiania i drugiej o wzajemnej pomocy w razie wystąpienia awarii jądrowej. W ramach pierwszej konwencji, państwa członkowskie zobowiązały się powiadamiać Agencję o wypadkach jądrowych. Druga, zapewnia szybką pomoc na prośbę państw członkowskich, aby ograniczyć do minimum wszelkie konsekwencje radiologiczne awarii, ochronić życie ludzi, dobra społeczne i środowisko.

5. Ryzyko związane z energetyką jądrową na tle innych zagrożeń

Jak wynika z danych amerykańskich (Raport Rasmussena) i danych OECD (Organizacja Współpracy Gospodarczej i Rozwoju), ryzyko związane z eksploatacją elektrowni z reaktorami II generacji jest kilka rzędów wielkości mniejsze od ryzyka pochodzącego od awarii elektrowni klasycznych i ryzyka związanego z innymi zagrożeniami.

Poza Czarnobyłem i częściowo Fukushima nikt nie stracił życia i zdrowia na skutek awarii reaktorów w elektrowniach jądrowych. Należy podkreślić, że ryzyko związane z eksploatacją re-

the decisions of the law: Atomic Law Regulations, Decisions of the Board of Ministers and decisions of the PAA Chairman. Moreover the system has to meet the requirements of the International Atomic Energy Agency (IAEA).

Total liability, which additionally cannot be assigned to any third party, for assuring the safety is borne by the owners of licenses for the activities on nuclear objects or in fact by the owners of these objects.

After the Chernobyl disaster a World Association of Nuclear Operators (WANO) was established. The aim of the WANO is to increase in maximum degree the safety and reliability of nuclear power stations. The association has been conducting a continuous exchange of information between the operators of the power plants and it has been organising the schedules of power plants inspections by independent experts, and the training courses, and the workshops and seminars.

Acceptation of two international conventions on early exchange of information and mutual assistance in cases of nuclear failures has proved to be also a significant event. In the frame of the first convention the member states have committed themselves to inform the Agency about nuclear incidents. The second one provides a rapid assistance to a member state asking for help in order to minimise all radiological consequences of the failure and save the lives, public assets and environment.

5. The Risk of Nuclear Energetic Industry against Other Threats

According to data provided by the US (Rasmussen Report) and OECD the risk connected with the use of the II-nd generation reactors is a few orders lower than caused by failures of conventional power stations or by other threats.

Besides Chernobyl and partially Fukushima there were no more fatalities or health losses caused by reactor failures in nuclear power plants. It has to be stressed that the risk at using cur-

aktorów obecnie budowanych, tj. reaktorów III generacji, jest około 100 razy mniejsze od ryzyka związanego z eksploatacją reaktorów II generacji.

6. Podsumowanie

Podobnie jak na naszej scenie politycznej, w przypadku wykorzystywania energii jądrowej w gospodarce narodowej, zainteresowana społeczność podzielona jest na dwa obozy: zwolenników i przeciwników budowy EJ w Polsce. Obecnie nikt nie wątpi, że nowoczesne reaktory jądrowe to najbardziej bezpieczny i ekologiczny sposób pozyskiwania energii. Biorąc pod uwagę fakt, iż zasoby ropy, gazu i węgla są ograniczone, obserwujemy ciągły wzrost zwolenników tego projektu. W Polsce nie ma trzęsień ziemi ani tsunami, a reaktory które zostały uszkodzone w Japonii miały około 30 lat. Reaktory III generacji niosą 100 – krotnie mniejsze ryzyko niż reaktory II generacji, m.in. – te w Fukushima.

rently constructed reactors of the III-rd generation is ca. 100 times lower than for the reactors of the II-nd generation.

6. Summary

Likewise in other public affairs the opinion on using the nuclear energy is divided on supporters and opponents of constructing a nuclear power plant in Poland. Now no one has any doubts that the modern nuclear reactors are the most safe and ecological ways for producing the energy. Considering that the resources of oil, gas and coal are limited a number of supporters of this project has been growing. The earth quakes and tsunami do not happen in Poland and reactors damaged in Japan have operated for 30 years. The reactors of the III-rd generation create the risk that is 100 times lower than for the II-nd generation reactors such as those used in Fukushima.

Literatura / Literature

- [1] Czerwiński A. „Energia jądrowa i promieniotwórczość”, OW Krzysztof Pazdro 1998;
- [2] G. Jezierski, „Energetyka jądrowa wczoraj i dziś”, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2005;
- [3] Jaśkowski J. „Fakty i mity energii atomowej” (Book 1987);
- [4] IAEA Country Nuclear Power Profiles;
- [5] International Atomic Energy Agency, Nuclear Security Series No. 7, Implementing Guide, Vienna, 2008. ;
- [6] Mielczarek M., 2000, Kultura bezpieczeństwa w przedsiębiorstwie, „Bezpieczeństwo Pracy”, nr 10, CIOP-IB, Warszawa.;
- [7] Encyklopedia multimedialna WIEM – 2003;
- [8] Opracowanie zespołowe „Stan i tendencje rozwojowe energetyki jądrowej na świecie w 1995”;
- [9] Pidgeon N., O’Leary M., 2000, Man-made Disasters: Why Technology and Organizations (Sometimes) Fail, “Safety Science”, Vol.34.;
- [10] Pidgeon N., 1997, The Limits to Safety? Culture, Politics, Learning and Man-made Disasters, “Journal of Contingencies and Crisis Management”, vol.5, No.1;
- [11] PN-EN 61513:2013-11E, Elektrownie jądrowe - oprzyrządowanie i systemy kontroli ważne dla bezpieczeństwa - wymagania ogólne dla systemów.
- [12] Podstawy bezpieczeństwa energetyki jądrowej. Szkoła Energetyki Jądrowej. Gdańsk, 20 października 2010r. mgr inż. Władysław Kielbasa.

- [13] Rola dozoru jądrowego w bezpieczeństwie elektrowni jądrowej; Maciej J. Jurkowski
- [14] „Energetyka jądrowa dla Polski”; Międzynarodowe Energetyczne Targi Bielskie, Bielsko Biała 11-14 września 2012 r.
- [15] Umowa Europejska ADR – stan prawny 1.07.2001 r. Wydawnictwo ONZ;
- [16] U.S Department of Energy, Office of Nuclear Energy, Science and Technology „The History of Nuclear Energy”, Washington, D.C.;
- [17] EJ Żarnowiec – atom.edu.pl;
- [18] Energetyka Jądrowa – Wikipedia,

