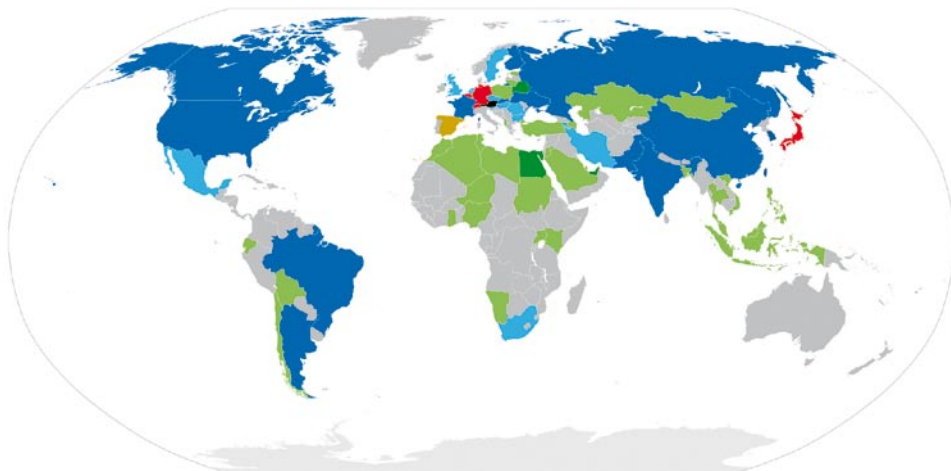


# ENERGETYKA JĄDROWA – ZA I PRZECIWI W WARUNKACH POLSKICH

## Energetyka jądrowa na świecie

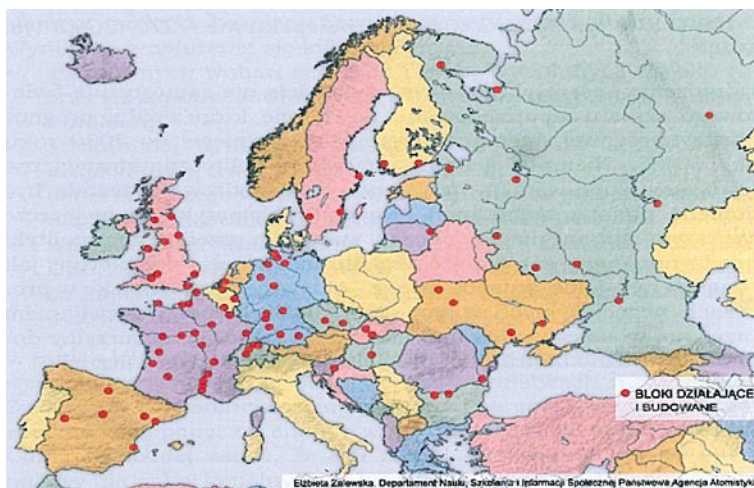
Na rys. 1 przedstawiono aktualny stan energetyki jądrowej (EJ) na świecie. Rysunek 2 przedstawia rozmieszczenie elektrowni jądrowych w Europie. Udział EJ w światowej produkcji energii elektrycznej wynosi aktualnie ok. 17%.



Legenda:

 Reaktory działające, trwa budowa nowych	 Reaktory działające, nie planuje się budowy nowych
 Reaktory działające, planuje się budowę nowych	 Reaktory działające, planowane wyłączenia
 Brak reaktorów, trwa budowa nowych	 Budowa reaktorów prawnie zakazana
 Brak reaktorów, planuje się budowę nowych	 Brak reaktorów

Rys. 1. Stan energetyki jądrowej na świecie [1]



Rys. 2. Rozmieszczenie elektrowni jądrowych w Europie  
(EJ Ignalina na Litwie – wyłączona w roku 2009) [2]

Zdecydowana większość z 440 aktualnie pracujących reaktorów energetycznych to reaktory II generacji. W Europie działa blisko 180 reaktorów. Na całym świecie budowanych jest 40 reaktorów. Są reaktory generacji III. Łączna moc nowych reaktorów wynosi 38 tys. MW. Najwięcej inwestycji realizowanych jest w Chinach (11 reaktorów), Rosji (8), Indiach (6), Korei Płd. (5) i na Bliskim Wschodzie (4). W Europie kończy się budowę 2 reaktorów (Flamanville – Francja, Olkiluoto – Finlandia, obydwu typu EPR-Areva). W 2012 roku rozpoczęto przygotowania do budowy EJ w Obwodzie Kaliningradzkim. Elektrownia ma mieć 2 reaktory typu VVER-1200 (rosyjska odmiana PWR). Uruchomienie pierwszego bloku planowane jest na 2017 rok.

Istnieje kilkanaście typów reaktorów energetycznych: BWR, CANDU, FBR, GCFR, GCR, HTGR, HTR, HWR, LMFBR, MSBR, OMR, PHWR, PWR, RBMK, THTR [3]. Blisko 95% energii elektrycznej wytwarzanej w elektrowniach jądrowych pochodzi z dwóch typów reaktorów: PWR (65%) i BWR (30%). Są to reaktory chłodzone zwykłą wodą ( $H_2O$ ), BWR – Boiling Water Reactor (reaktor z wrzącą wodą), PWR – Pressurized Water Reaktor (ciśnieniowy reaktor wodny). Nowe elektrownie jądrowe (EJ III generacji) są wyposażone w reaktory typu PWR lub BWR, np. EPR-Areva-Francja (rys. 3), AP-1000-Westinghouse-USA (rys. 4), ABWR-General Electric-Hitachi/Toshiba-USA-Japonia. Informacje zamieszczone w niniejszym opracowaniu dotyczą elektrowni z reaktorami PWR.



Rys. 3. EPR, EJ III generacji (Francja, AREVA) [4]



Rys. 4. AP-1000, EJ III generacji (USA, Westinghouse) [5]

Niżej podano najważniejsze cechy EJ z reaktorami III generacji:

- duża „głębokość” wypalenia paliwa: 60–65 GWd/t; w II generacji do 45 GWd/t,
- długi czas eksploatacji: 60 lat; w II generacji: 40 lat,
- wyższa sprawność energetyczna: 35%; II generacja maksymalnie 33%,
- krótszy projektowy czas budowy: 5 lat, II generacja 7 lat,
- prostsza, bardziej niezawodna konstrukcja (np. AP-1000 ma o 35% mniej pomp, 60% mniej rurociągów związanych z bezpieczeństwem, 50% mniej zaworów w układzie bezpieczeństwa),
- możliwość pracy przy zmiennym obciążeniu: 20–100% mocy nominalnej,
- od początku projektowana z myślą o przyszłej likwidacji,
- pasywne systemy w układzie bezpieczeństwa (systemy pasywne nie wymagają zasilania energią z zewnątrz, wykorzystują naturalne zjawiska fizyczne),
- wyposażona w chwytacz rdzenia (MHA, „chiński syndrom”),
- obudowa bezpieczeństwa odporna na upadek dużego samolotu pasażerskiego (wymóg wprowadzony po 11.09.2001),

- obudowa bezpieczeństwa wyposażona w układ katalitycznej rekombinacji wodoru (wodór powstaje w wysokiej temperaturze w wyniku reakcji cyrkonu z wodą i w obecności powietrza tworzy mieszaninę wybuchową).

## Fizyczne podstawy działania EJ

Masa spoczynkowa każdego jądra atomowego jest mniejsza od sumy mas spoczynkowych tworzących go nukleonów (protonów i neutronów). Dla jądra o masie  $M$ , zbudowanego z  $Z$  protonów o masie  $m_p$  i  $N$  neutronów o masie  $m_n$ , niedobór masy (defekt masy)  $\Delta m$  jest równy:

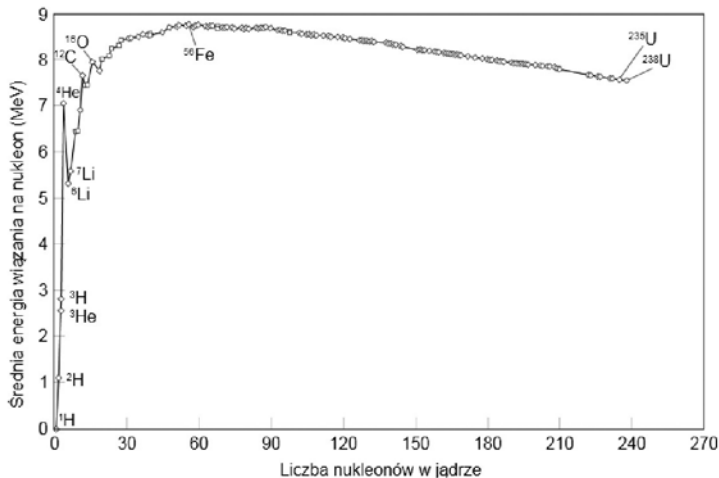
$$\Delta m = Z m_p + N m_n - M$$

$\Delta m$  jest miarą energii wiązania nukleonów w jądrze, która wydziela się przy tworzeniu jądra:

$$\Delta E = \Delta m c^2$$

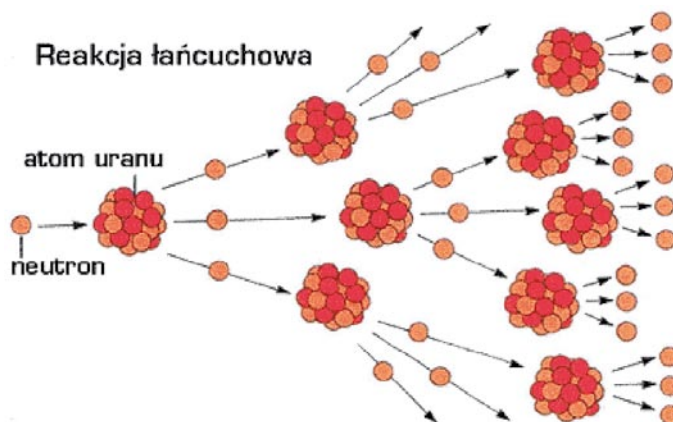
$c$  – prędkość światła w próżni ( $3 \cdot 10^8$  m/s)

Energia wiązania jądra jest wielkością równą pracy, którą należałoby wykonać, aby rozdzielić jądro na poszczególne nukleony bez nadania im energii kinetycznej. Średnią energię wiązania przypadającą na jeden nukleon  $\Delta E / (Z + N)$  pokazano na rys. 5.



Rys. 5. Energia wiązania jąder atomowych [3]

Jak wynika z rys. 5 różnica pomiędzy energią wiązania na jeden nukleon w ciężkim jądrze uranu o liczbie masowej  $A = N + Z = 235$  (U-235), jest w przybliżeniu o 0,85 MeV mniejsza od energii wiązania jąder izotopów o średnich liczbach masowych  $A = 115 \pm 50$ . Z tego powodu rozszczepieniu jednego jądra U-235 na dwa lżejsze izotopy towarzyszy wyzwolenie energii równej  $235 \times 0,85 \text{ MeV} \approx 200 \text{ MVe}$ . Powyższą reakcję wywołują neutrony o małych energiach, tzw. neutrony termiczne. Produktem reakcji, oprócz energii, są 2 lub 3 nowe neutrony zdolne (po wyhamowaniu czyli moderacji) do wywołania następnych rozszczepień czyli samopodtrzymującej się reakcji łańcuchowej (rys. 6) W reaktorze jądrowym reakcja łańcuchowa, przebiega w sposób kontrolowany.

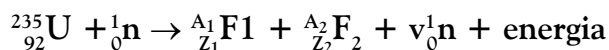


Rys. 6. Reakcja łańcuchowa [6]

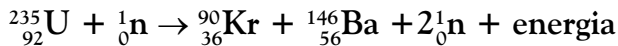
## Elektrownia jądrowa (EJ), a elektrownia konwencjonalna (EK)

Z termodynamicznego punktu widzenia nie ma istotnej różnicy pomiędzy EJ i EK. Obydwie (EJ i EK) są elektrowniami ciepłymi realizującymi obieg termodynamiczny Clausiusa-Rankina. W EJ źródłem ciepła jest wspomniana wcześniej reakcja jądrowa rozszczepienia ciężkich jader uranu lub plutonu (U-235, Pu-239). Przykład takiej reakcji przedstawiono poniżej.

### Reakcja jądrowa rozszczepienia U-235 (wiele możliwych wariantów)



### Jeden z możliwych przypadków:



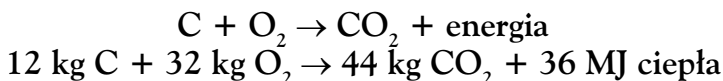
1 izotop U-235 + 1 neutron →  
→ 1 izotop Kr-90 + 1 izotop Ba-146 + 2 neutrony  
+ 200 MeV ciepła

$$200 \text{ MeV/rozszczenie} = 32 \cdot 10^{-12} \text{ J/rozszczenie}$$

W rdzeniu reaktora o mocy elektrycznej 1000 MW zachodzi ok.  $10^{20}$  rozszczepień na sekundę.

W elektrowni konwencjonalnej (EK) energia chemiczna spalanego paliwa (węgla, ropy, gazu, drewna) zamieniana jest na energię cieplną spalin.

### Reakcja chemiczna spalania węgla:

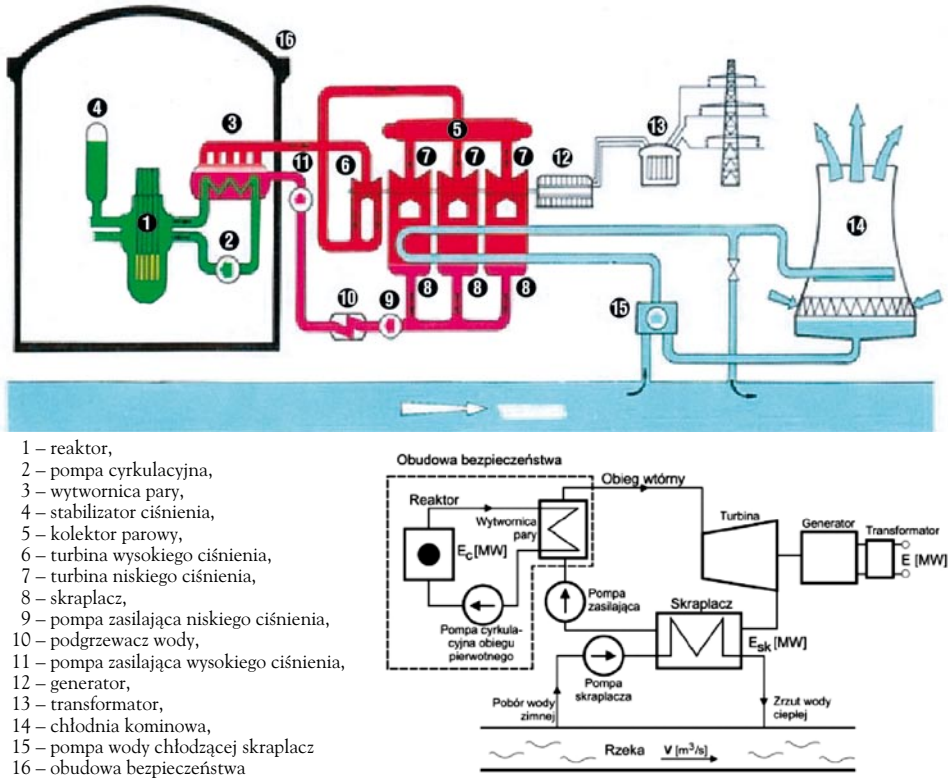


Gorące spaliny w EK lub rozgrzane paliwo jądrowe w EJ podgrzewają i odparowują wodę. W turbinie energia cieplna pary wodnej zamieniana jest na energię mechaniczną. Turbina napędza generator, w którym energia mechaniczna zamieniana jest na energię elektryczną. W skrócie powyższe przemiany energii można przedstawić następująco:

**EK: energia chemiczna → energia cieplna →  
→ energia mechaniczna → energia elektryczna**

**EJ: energia jądrowa → energia cieplna →  
→ energia mechaniczna → energia elektryczna**

Na rys. 7 pokazano schemat EJ z reaktorem PWR.



Rys. 7. Schemat EJ z reaktorem PWR.

## Istotna różnica pomiędzy EJ i EK podczas normalnej eksploatacji

W elektrowni konwencjonalnej paliwo dostarczane jest w sposób ciągły do kotła. Elektrownia węglowa o mocy 1000 MW spala ok. 3,15 milionów ton węgla kamiennego w ciągu roku (360 ton/godz). Spaliny w elektrowni konwencjonalnej ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ) usuwane są na bieżąco do otoczenia. Na każdy kilogram spalonego węgla (czystego pierwiastka) przypada  $44/12 = 3,67$  kg dwutlenku węgla ( $\text{CO}_2$ ).

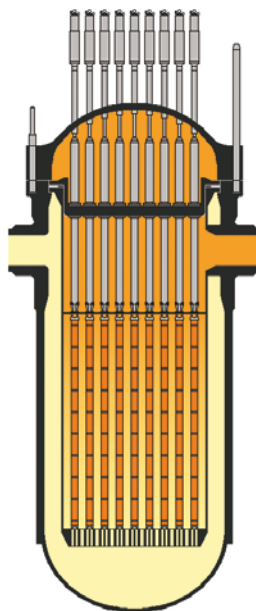
Do uruchomienia elektrowni jądrowej o mocy elektrycznej 1000 MW potrzeba zaledwie 18-20 ton świeżego paliwa. Paliwo jądrowe ma postać pastylek wykonanych z dwutlenku uranu ( $\text{UO}_2$ ) wzbogaconego w izotop U-235 maksymalnie do 5%. (rys. 8). Pastylki umieszczane są wewnątrz szczelnych rurek (prętów paliwowych) wykonanych ze stopu cyrkonu. Pręty tworzą zestawy zwane kasetami (rys. 9). Kasety umieszczane są w zbiorniku ciśnieniowym reaktora i tworzą tzw. rdzeń (rys. 10).



Rys. 8. Pastyłki paliwa jądrowego [7]



Rys. 9. Kaset z paliwem jądrowym [8]

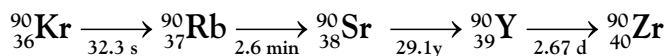


Rys. 10. Rdzeń i zbiornik ciśnieniowy reaktora EPR [8]

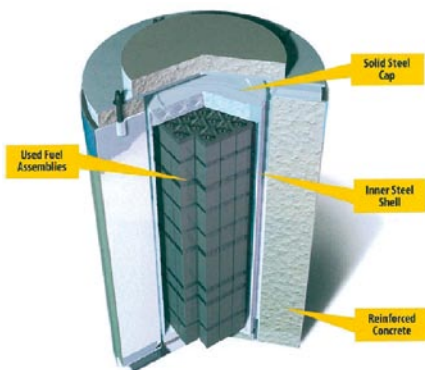
Raz w roku 1/3 paliwa (czyli ok. 6 ton) ulega wymianie. Procedura wymiany trwa kilka dni. Zużyte paliwo przez minimum kilka lat przechowywane jest na terenie elektrowni. Najpierw w specjalnych basenach wodnych, a następnie w szczelnych kontenerach (rys. 11).

Produkty rozszczepienia zawarte w zużytym paliwie jądrowym (np. krypton Kr-90) oraz produkty ich naturalnego rozpadu promieniotwórczego (np. rubid-90, stront-90, cyrkon-90), pozostają uwięzione w elementach paliwowych. Naturalny rozpad promieniotwórczy produktów rozszczepienia na przykładzie kryptonu przebiega następująco:

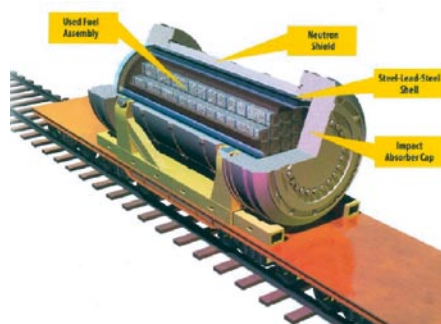




W miarę upływu czasu aktywność promieniotwórcza produktów rozszczepienia i rozpadu oraz wytwarzane przy tym ciepło maleją. Jest proces naturalny, którego nie można w żaden sposób przyspieszyć ani opóźnić.



Rys. 11. Kontener na wypalone paliwo (składowisko tymczasowe – teren elektrowni) [9]



Rys. 12. Kontener kolejowy do transportu wypalonego paliwa jądrowego [9]

Po kilku lub kilkunastu latach przebywania na terenie elektrowni zużyte paliwo jest transportowane (rys. 12) do zakładu przerobu, w celu odzyskania cennych izotopów i produkcji nowego paliwa. Jest to tzw. cykl paliwowy zamknięty. Drugą z możliwości jest tzw. cykl paliwowy otwarty. W tym przypadku zużyte paliwo jest transportowane na składowisko wysokoaktywnych odpadów promieniotwórczych.

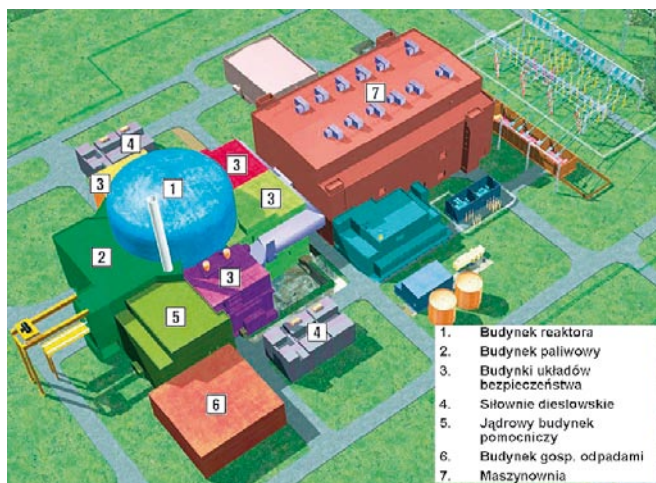


Rys. 13. Elementy kontenera do ostatecznego składowania wypalonego paliwa [10]

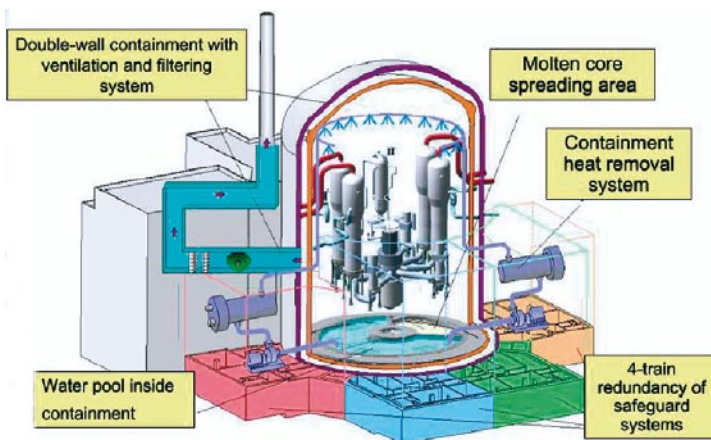
Na rys. 13 pokazano elementy składowe najnowszego szwedzko-fińskiego kontenera (miedz-stal-beton) przeznaczonego do ostatecznego składowania kaset ze zużytym paliwem jądrowym. Takie kontenery będą przechowywane w sztolniach wykutych w skale na głębokości kilkuset metrów pod dnem Bałtyku (składowisko Forsmark, ok. 150 km na północ od Sztokholmu).

### Istotna różnica pomiędzy EJ i EK w sytuacjach awaryjnych

Z uwagi na ciągłe usuwanie produktów spalania w EK – spalin i popiołu, poważna awaria takiej elektrowni (np. na wybuch kotła, lub pożar generatora), nie grozi uwolnieniem dużych ilości groźnych substancji do otoczenia. Substancje te bowiem już zostały uwolnione. W przypadku EJ potencjalne skutki awarii mogą być znacznie poważniejsze. Rdzeń reaktora typu PWR o mocy elektrycznej 1000 MW, po roku pracy z pełną mocą, zawiera ok. 400 izotopów w dużej części promieniotwórczych, których aktywność wynosi ok.  $10^{23}$  Bq (1Bq (beckerel) = 1 rozpad/sekundę). Maksymalna Hipotetyczna Awaria EJ (MHA) polega na stopieniu rdzenia reaktora. Aby nie dopuścić do uszkodzenia rdzenia, a tym bardziej do jego stopienia, elektrownia wyposażona jest w bardzo rozbudowany układ bezpieczeństwa. W skład tego układu wchodzi kilkanaście systemów zbudowanych według zasad: nadmiarowości (4-krotna redundancja), różnorodności, przestrzennego rozdzielania, bezpiecznego kierunku, materiałowej i technologicznej elitarności [2, 3, 6]. Na rysunkach 14 i 15 pokazano rozmieszczenie budynków i główne cechy bezpieczeństwa EJ III generacji.

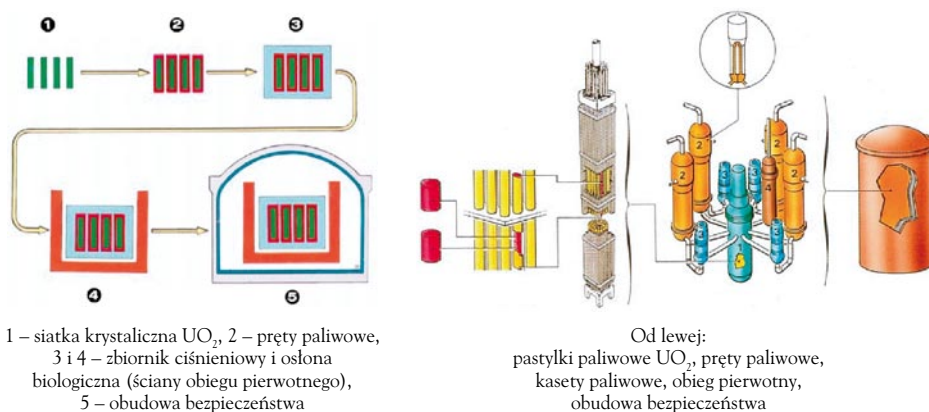


Rys. 14. Układ przestrzenny obiektów bloku energetycznego z reaktorem EPR [8]



Rys. 15. Główne cechy bezpieczeństwa reaktora EPR [8]

Zadaniem systemów układu bezpieczeństwa jest nie dopuścić do uszkodzenia rdzenia, a w przypadku gdyby jednak do tego doszło – zapobiec wydostaniu się (uwolnieniu) substancji promieniotwórczych do otoczenia. Na rys. 16 pokazano system barier zapobiegających takiemu uwolnieniu.



Rys. 16. Bariery uniemożliwiające wydostaniu się substancji promieniotwórczych do otoczenia

Koszt układu bezpieczeństwa EJ III generacji stanowi 35-40% kosztów całej elektrowni. Oznacza to, że przeznaczamy 1,5–2 mld EUR/1000 MW na wyposażenie EJ w układ, który chcielibyśmy, aby nigdy nie musiał zadziałać. **Wysokie koszty inwestycyjne EJ są ceną jaką płacimy za wysokie bezpieczeństwo.**

## Specyfika warunków polskich – na czym polega?

Wybór miejsca lokalizacji EJ uzależniony jest od wielu czynników. W przypadku Polski są to:

- na południu kraju mamy duże złoża węgla kamiennego i małe zasoby wody,
- w pasie środkowym występują duże pokłady węgla brunatnego i małe ilości wody,
- na północy brak jest złóż paliw konwencjonalnych, ale dużo wody (Bałtyk),
- w całym kraju brak odpowiednio dużych rzek i śródlądowych zbiorników wodnych, w związku z tym brak możliwości znaczącego rozwoju energetyki wodnej oraz konieczność stosowania chłodni kominowych w elektrowniach ciepłych zlokalizowanych w głębi kraju,
- umiarkowane warunki do rozwoju zawodowej energetyki wiatrowej z wyjątkiem wybrzeża i części pasa środkowego (rys. 17),
- słabe warunki do rozwoju energetyki słonecznej, możliwość rozwoju źródeł małej mocy w systemie rozproszonym (rys. 18),



Rys. 17. Warunki wietrzne w Polsce

Źródło: Ecomanager 2/2010, str. 26



Rys. 18. Nasłonecznienie Polski

Źródło: GeoModel Solar

- dobre warunki do rozwoju energetyki wykorzystującej biopaliwa,
- ponad 80% rocznej produkcji energii elektrycznej pochodzi z elektrowni węglowych,
- blisko 90% mocy jest zainstalowane w starych elektrowniach (30–40-letnich i starszych) – tablica 1,

- przewidywany wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną z obecnych 160 TWh do 210 TWh w roku 2030 i mocy zainstalowanej z 34 tys. MW do 51 tys. MW,
- nie zrealizowany w latach 80. XX w. pierwszy program budowy EJ,
- powrót do programu budowy EJ po 30-latach.

Tablica 1. Planowana likwidacja mocy wytwórczych w Polsce [11]

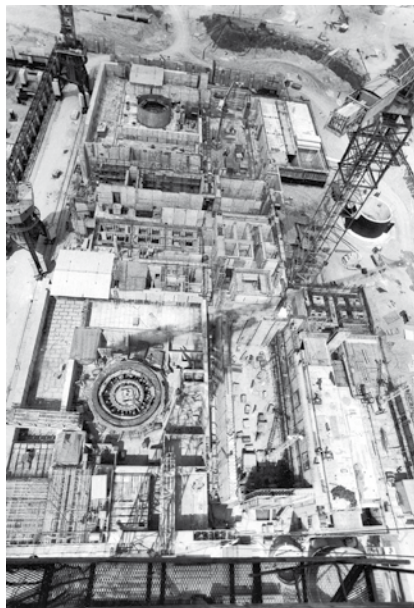
Rok	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	Razem
MW	750	1200	1700	500	2500	1100	2300	10000

### Pierwszy rządowy program budowy EJ w Polsce

Pierwszy program budowy EJ w Polsce realizowano w latach 80-tych ubiegłego wieku. Zaawansowano budowę EJ Żarnowiec (4 bloki VVER-440, rys. 19 i 20) i rozpoczęto przygotowania do budowy EJ-Warta (2 bloki VVER-1000). Program został definitywnie zakończony na początku lat 90. XX w. Decyzje o przerwaniu budowy EJ Żarnowiec i wstrzymaniu przygotowań do budowy EJ-Warta podjęto kilka lat wcześniej. Głównym powodem rezygnacji był gwałtowny spadek zapotrzebowania na energię elektryczną wynikający z restrukturyzacji przemysłu – likwidacja hut, kopalń i znacznej części przemysłu elektromaszynowego. Zmianie uległy plany rozwoju gospodarczego – zrezygnowano z rozbudowy energochłonnych gałęzi gospodarki w tym przemysłu zbrojeniowego. Nie bez znaczenia był bardzo niski poziom akceptacji społecznej spowodowany awarią w Czernobylu (26.04.1986) oraz faktem, że wszystkie 6 planowanych bloków jądrowych miało pochodzić z kraju, w którym do wspomnianej awarii doszło (ZSRR).



Rys. 19. EJ Żarnowiec – zdjęcie z czerwca 1989 r. z okresu zatrzymania budowy (fot. Stanisław Wiesiołowski) [7]



Rys. 20. Budowa EJ Żarnowiec – bloki nr 1 i 2 (I etap inwestycji), zdjęcie zrobione w chwili zatrzymania prac decyzją rządową, czerwiec 1989 r. (fot. Stanisław Wiesiołowski) [7]

### **Działania w PP w latach 80. XX w.**

Politechnika Poznańska w latach 1979–1993 uczestniczyła w działaniach na rzecz budowy EJ w Polsce. Udział obejmował zarówno kształcenie, jak i badania naukowe. Powstało laboratorium izotopowe. Na Wydziale Elektrycznym uruchomiono 2 edycje studiów podyplomowych. Na Wydziale Maszyn Roboczych i Pojazdów (obecnie WMRIiT) powołano Zespół Naukowo-Badawczy Siłowni Jądrowych. W zespole tym, we współpracy IBJ (później IEA) w Świerku, zrealizowano 21 projektów badawczych, obroniono 3 prace doktorskie i wypromowano kilkunastu dyplomantów.

### **Drugi rządowy program rozwoju EJ**

Po 30 latach od rozpoczęcia pierwszego programu, w roku 2009 powrócono do koncepcji wybudowania EJ w Polsce. Tym razem u podstaw takich planów legły:

- wzrost cen energii pochodzącej z elektrowni węglowych wynikający z opłat środowiskowych za emisję CO<sub>2</sub> (pakiet energetyczno-klimatyczny, [14]),
- prognozowany wzrost zużycia energii elektrycznej do roku 2050,

- bardzo duży stopień technicznego zużycia większości węglowych elektrowni zawodowych (Tablica 1),
- brak realnych możliwości pokrycia prognozowanego zapotrzebowania na energię elektryczną z OZE (Odnawialne Źródła Energii: woda, Słońce, wiatr, biopaliwa).

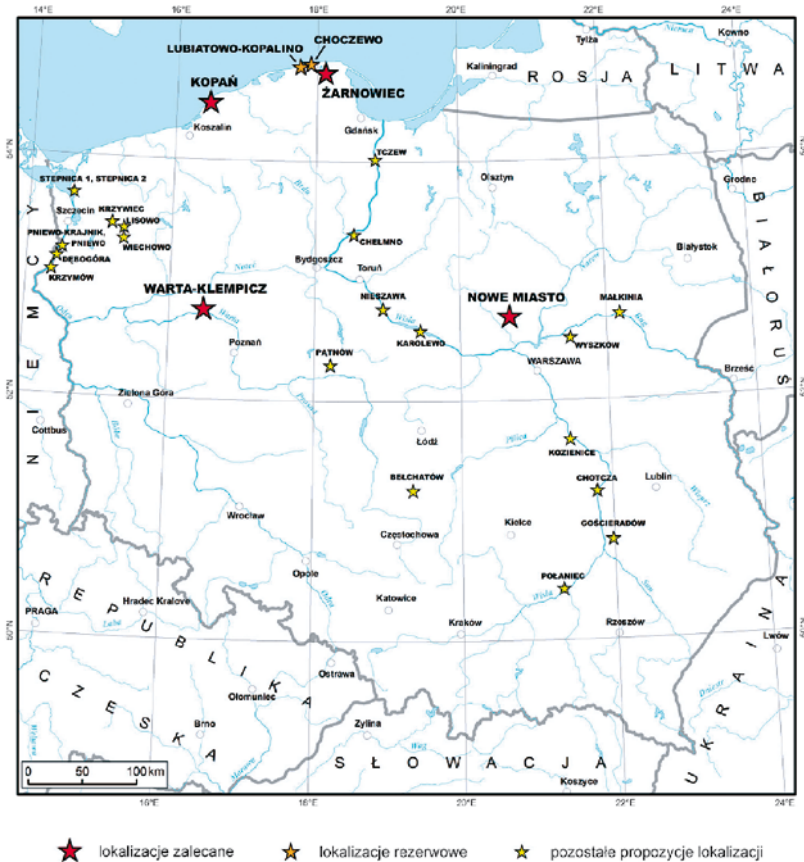
W ciągu trzech lat realizacji programu (2009–2012):

- powołano Pełnomocnika Rządu do spraw EJ,
- utworzono Departament Energii Jądrowej w Ministerstwie Gospodarki,
- wskazano inwestora strategicznego (PGE – Polska Grupa Energetyczna),
- opracowano Program Polskiej Energetyki Jądrowej wraz z harmonogramem jego realizacji [12], zaproponowano 27 potencjalnych miejsc lokalizacji EJ pierwszej polskiej EJ (Tablica 2, rys. 21), na czele listy znalazły się EJ-Żarnowiec (rys. 22) i EJ-Warta-Klempicz (rys. 23),
- opracowano Prognozę Oddziaływania na Środowisko Program Polskiej EJ [13],
- znowelizowano Prawo Atomowe,
- powołano Narodowe Centrum Badań Jądrowych,
- na początku 2012 roku inwestor strategiczny (PGE) przedstawił 3 swoje preferencje lokalizacyjne dla pierwszej EJ: Żarnowiec, Choczewo, Gąski – wszystkie nadmorskie,
- we wrześniu 2012 roku 4 firmy: PGE, KGHM, TAURON i ENEA podpisały porozumienie o wspólnym inwestowaniu w budowę EJ w Polsce.

Tablica. 2. Lista rankingowa lokalizacji EJ w Polsce [12]

L.p.	Lokalizacja	Punkty	L.p.	Lokalizacja	Punkty
1	Żarnowiec	65,6	15	Wyszków	48,0
2	Warta-Klempicz	59,9	16	Pniewo	47,9
3	Kopań	55,8	17	Pniewo-Krajnik	47,9
4	Nowe Miasto	55,3	18	Lubiatowo-Kopalino	47,2
5	Bełchatów	53,1	19	Dębogóra	46,2
6	Nieszawa	52,0	20	Stepnica-1	45,3
7	Tczew	51,8	21	Stepnica-2	45,3
8	Choczewo	51,0	22	Wiechowo	45,2
9	Połaniec	49,7	23	Karolewo	44,8
10	Chotcza	49,6	24	Lisowo	44,8
11	Malkina	49,1	25	Gościeradów	43,6
12	Krzywiec	49,0	26	Chełmno	42,2
13	Krzymów	48,8	27	Pątnów	39,6
14	Kozienice	48,2			

### POTENCJALNE LOKALIZACJE ELEKTROWNI JĄDROWYCH



Rys. 21. Potencjalne lokalizacje elektrowni jądrowych w Polsce [12]

Ramowy harmonogram działań przedstawiony w połowie 2009 roku przewidywał 4 etapy:

- **Etap I** do 31.12.2010: opracowanie i przyjęcie przez Radę Ministrów Programu polskiej energetyki jądrowej,
- **Etap II** 2011–2013: ustalenie lokalizacji i zawarcie kontraktu na budowę pierwszej elektrowni jądrowej,
- **Etap III** 2014–2015: wykonanie projektu technicznego i uzyskanie wszystkich wymaganych prawem uzgodnień i zezwoleń,
- **Etap IV** 2016–2020: budowa pierwszej elektrowni jądrowej w Polsce.

Powyzszy harmonogram jest dzisiaj nieaktualny. Nie ma szans na oddanie pierwszego bloku w roku 2020. Ostatnie korekty wskazują na rok 2023, a nawet 2025.





Rys. 22. Proponowana lokalizacja EJ Żarnowiec [13]



Rys. 23. Proponowana lokalizacja EJ Warta-Klempicz [13]

## Aktualnie zaangażowanie PP w zakresie EJ

W styczniu 2009 roku JM Rektor PP powołał Pełnomocnika ds. EJ w PP. W marcu 2009 utworzony został Międzywydziałowy Zespół ds. Kształcenia w zakresie EJ. W skład Zespołu weszli przedstawiciele 5 wydziałów: Elektrycznego, Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Technologii Chemicznej, Fizyki Technicznej i Maszyn Roboczych i Transportu.

W maju 2009 Rada Wydziału Elektrycznego podjęła uchwałę o uruchomieniu specjalności EJ w ramach kierunku studiów „Energetyka”. W połowie 2012 roku specjalność EJ studiuje 30 studentów studiów stacjonarnych 1-stopnia.

Od ponad 40 lat w PP (obecnie na Wydziale Technologii Chemicznej) działa Laboratorium Izotopowe zajmujące powierzchnię ok. 150 m<sup>2</sup>. W skład Laboratorium wchodzi: pomieszczenie laboratoryjne klasy III (licencja PAA D-14947), pomieszczenie laboratoryjne klasy Z (licencja PAA D-14947), magazyn radioizotopów i magazyn odpadów promieniotwórczych.

Od blisko 3 lat przedstawiciele PP regularnie uczestniczą w spotkaniach organizowanych przez Departament Energii Jądrowej Ministerstwa Gospodarki (DEJ MG). Biorą udział w spotkaniach z Misjami Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej (IAEA) oraz przedstawicielami przemysłu jądrowego goszczącymi w Polsce. Politechnika Poznańska jest członkiem trzech grup roboczych utworzonych w DEJ MG.

Przedstawiciele PP od roku 2009 współpracują z Urzędem Marszałkowskim Województwa Wielkopolskiego w ramach w Zespołu Doradczego ds. EJ. Uczestniczyli między innymi w wyjazdach edukacyjno-szkoleniowych do elektrowni jądrowych we Francji, Szwecji, Kanady i USA.

Pracownicy PP są zapraszani przez władze samorządowe, dyrekcje szkół oraz organizacje techniczne (NOT, SIMP, SEP) na spotkania o charakterze informacyjno-edukacyjnym w całej Wielkopolsce (Poznań, Piła, Czarnków, Trzcianka, Krzyż Wlkp., Gorzów, Leszno, Lubasz).

W latach 2010–2011 dwóch pracowników naszej uczelni ukończyło wielomiesięczny 3-etapowy program szkolenia „Edukatorów EJ” we Francji.

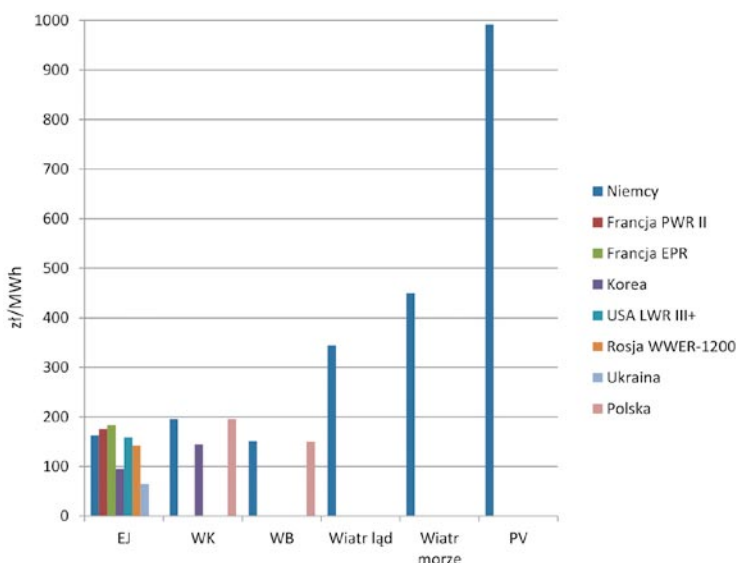
Latem 2012 roku kilkoro studentów PP wyjechało na 3-miesięczne staże naukowe „Kadry dla polskiej EJ” do USA.

W sierpniu 2012 Politechnika Poznańska przystąpiła, jako członek założyciel, do ogólnopolskiego klastra EUROPOLBUDATOM wspierającego plany budowy EJ w Polsce.

## Argumenty za budową EJ w Polsce

Czynniki sprzyjające planom budowy elektrowni jądrowych są kombinacją wcześniej omówionych cech EJ oraz krajowej specyfiki. Niżej zebrano i rozwinięto argumenty za budową elektrowni jądrowych w Polsce.

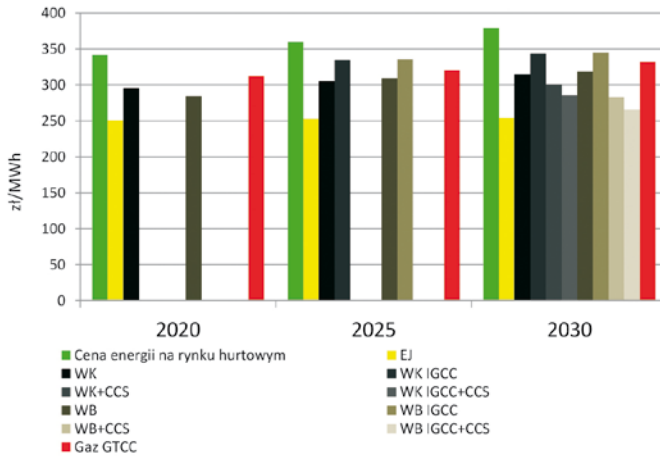
- Obecna trudna sytuacja energetyczna Polski – duży stopień wyeksploatowania elektrowni i elektrociepłowni zawodowych (Tablica 1).
- Ograniczone możliwości zaspokojenia przewidywanego wzrostu zapotrzebowania na energię elektryczną ze źródeł alternatywnych w tym odnawialnych (OZE), rys. 24 i 25.



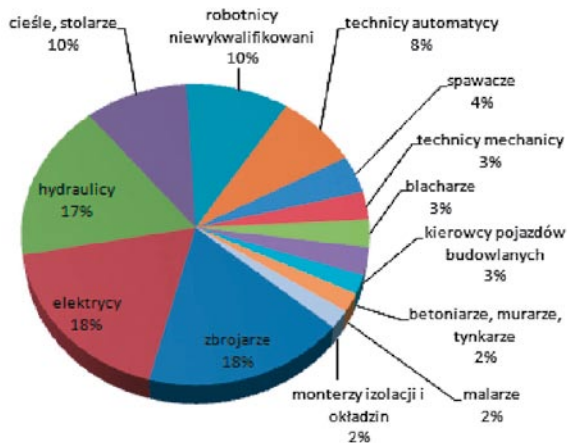
Rys. 24. Koszty wytwarzania energii elektrycznej w 2010 r. w różnych źródłach wytwórczych w wybranych krajach z uwzględnieniem Polski na podstawie danych IEA i NEA/OECD [7]; WK – węgiel kamienny, WB – węgiel brunatny, PV – fotowoltaika; koszty dla węgla kamiennego i brunatnego bez kosztu uprawnień do emisji CO<sub>2</sub>

- Szansa na obniżenie emisji CO<sub>2</sub> i uniknięcie związanych z tym wysokich kosztów za zanieczyszczania atmosfery. Przyjęty przez Polskę pakiet energetyczno-klimatyczny „3 razy 20%” [14] przewiduje między innymi konieczność zmniejszenia do 2020 roku emisji gazów cieplarnianych o co najmniej 20%, w porównaniu do 1990 roku (Tablica 3).
- Szansa na znaczące zaangażowanie i rozwój krajowego przemysłu, zwłaszcza przedsiębiorstw z branży budowlanej, instalacyjnej, elektromaszynowej. Bezpośrednio na budowie EJ, przez kilka lat, zatrudnionych jest od 2000

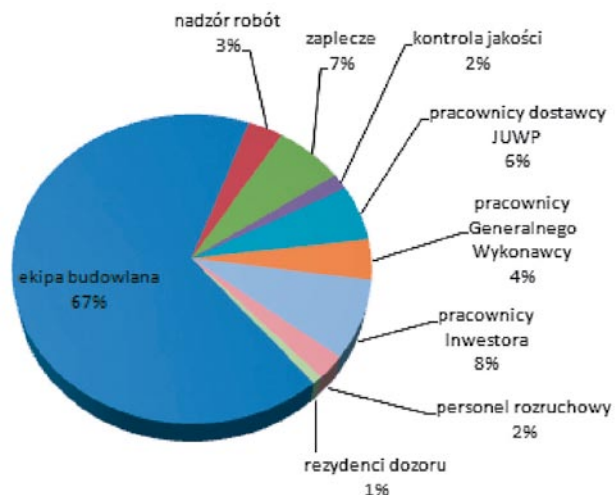
do 3500 pracowników. Liczba pracowników zatrudnionych przy eksploatacji jednego bloku jądrowego wynosi od 700 do 900 osób. W większości jest to kadra o bardzo wysokich kwalifikacjach. Szczegółowe dane podano w Tablicach 4, 5 i 6 oraz na rysunkach 26 i 27.



Rys. 25. Projekcja kosztów wytwarzania i ceny energii na polskim rynku do 2030 roku, wykonana przez Agencję Rynku Energii S.A. (aktualizacja z 2011 r.) [7], WK – węgiel kamienny, WB – węgiel brunatny, CCS – Carbon Capture and Storage, GTCC – Gas Turbine Combined Cycle, IGCC – Integrated Gasification Combined Cycle



Rys. 26. Struktura zawodów/specjalności na budowie EJ – ekipa budowlana. Udział specjalistów w szczycie robót (minimalna załoga, dla bloku referencyjnego 1300 MW, warunki amerykańskie) [7, 15]



Rys. 27. Struktura zatrudnienia podczas budowy EJ – pozostałe grupy (EJ 1 blok) [7, 15]

- Szansa na wejście na nowy poziom rozwoju technologicznego i organizacyjnego oraz na awans cywilizacyjny terenów w otoczeniu EJ (infrastruktura, szkolnictwo, usługi).
- Szansa na znaczący rozwój instytutów naukowo-badawczych (NCBJ – Narodowe Centrum Badań Jądrowych, CELOR – Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej, ICHiTJ – Instytut Chemii i Techniki Jądrowej, IFJ – Instytut Fizyki Jądrowej).

Wyniki pokazane na rys. 25 otrzymano przy następujących, niekorzystnych dla EJ, założeniach: współczynnik wykorzystania mocy taki sam dla wszystkich źródeł – 0,9, koszty mocy zainstalowanej w EJ na poziomie 3,5 mld EUR/1000 MW, projektowy okres eksploatacji EJ – 40 lat (zamiast 60 lat).

Tablica 3. Emisja CO<sub>2</sub> na jednostkę wytwarzanej energii elektrycznej (pełen cykl: budowa, eksploatacja usuwanie odpadów, [g/kWh])

	Węgiel brunatny	Węgiel kamienny	Ropa	Gaz	Hydro	Biomasa	Wiatr	EJ
Max.	1372	1026	775	469	90	49	22	40
Min.	1062	834	657	399	5	15	7	3
Średnio	1217	930	716	434	47,5	32	14,5	21,5

Źródło: Word Energy Council, London 2004

Tablica 4. Struktura zawodów/specjalności na budowie EJ – ekipa budowlana.  
 Udział specjalistów w szczycie robót (minimalna załoga, dla bloku referencyjnego  
 1300 MW, warunki amerykańskie) [7, 15]

Specjaliści	Udział procentowy	Liczba (EJ 1 blok)	Liczba (EJ 2 bloki)
spawacze ( <i>boilermakers</i> )	4	60	96
cieśle szalunkowi, stolarze ( <i>carpenters</i> )	10	160	256
elektrycy, monterzy instalacji i urządzeń elektrycznych ( <i>electricians/instrument fitters</i> )	18	290	464
zbrojarze ( <i>ironworkers</i> )	18	290	464
izolery ( <i>insulators</i> )	2	30	48
robotnicy niewykwalifikowani ( <i>laborers</i> )	10	160	256
betoniarze, murarze, tynkarze ( <i>masons</i> )	2	30	48
technicy mechanicy ( <i>millwrights</i> )	3	50	80
technicy automatyki ( <i>operating engineers</i> )	8	130	208
malarze ( <i>painters</i> )	2	30	48
hydraulicy, monterzy instalacji wodno-kanalizacyjnej i rurociągów technologicznych ( <i>pipefitters</i> )	17	270	432
blacharze ( <i>sheetmetal workers</i> )	3	50	80
kierowcy pojazdów budowlanych ( <i>teamsters</i> )	3	50	80
<b>Łącznie ekipa budowlana</b>	<b>100</b>	<b>1600</b>	<b>2560</b>

Tablica 5. Struktura zatrudnienia podczas budowy EJ  
 – pozostałe grupy (EJ 1 blok) [7, 15]

Grupa	Udział procentowy	Liczba osób
ekipa budowlana ( <i>craft labor</i> )	67	1600
nadzór robót – inżynierowie, kierownicy robót, bez brygadzystów ( <i>craft supervision</i> )	3,3	80
pracownicy zaplecza, ochrona ( <i>site indirect labor</i> )	6,6	160
kontrola jakości ( <i>quality control inspectors</i> )	1,7	40
pracownicy dostawcy JUWP i poddostawców ( <i>NSSS vendor and subcontractor staffs</i> )	5,8	140
pracownicy Generalnego Wykonawcy ( <i>EPC contractor`s managers, engineers and schedulers</i> )	4,2	100
pracownicy inwestora – załoga ruchowa i remontowa ( <i>owner`s O&amp;M staff</i> )	8,4	200
załoga rozruchowa ( <i>start-up personnel</i> )	2,5	60
rezydenci dozoru jądrowego	0,8	20
<b>Łącznie na budowie</b>	<b>100</b>	<b>2400</b>

Tablica 6. Kategorie wymaganego personelu dla elektrowni jądrowej [7, 16]

	Kategoria personelu	Przybliżona liczebność
1	Personel ochrony fizycznej, straż pożarna	70
2	Inżynierowie projektu	30
3	Technicy chemicy	20
4	Inżynierowi jądrowi	25
5	Obsługa administracyjna, analitycy, pozostały personel	335
6	Technicy utrzymania ruchu – w tym elektrycy, technicy układów pomiarowych i sterujących, mechanicy	135
7	Inżynierowie mechanicy	15
8	Inżynierowi budowlani	5
9	Personel szkoleniowy	35
10	Operatorzy sterowania i wyposażenia bloku	75
11	Inżynierowi komputerowi, inżynierowie elektrycy oraz inżynierowie systemów pomiarowych i sterujących	20
12	Technicy ochrony radiologicznej i zarządzania odpadami promieniotwórczymi	35
	SUMA	800

- Niskie koszty eksploatacyjne EJ.
- Długi czas eksploatacji EJ (60 lat).
- Wysokie wykorzystanie mocy zainstalowanej w EJ (idealne warunki eksploatacji EJ to praca ciągła z pełną mocą).
- Stabilność rynku dostawców paliwa jądrowego (światowe pokłady uranu: Australia 24%, Kazachstan 17%, Kanada 9%, USA 7%, RPA 7%) z możliwością sięgnięcia po zasoby własne.
- Brak konfliktu planów rozwoju OZE i budowy EJ. Elektrownie jądrowe pokrywają podstawowe (tzn. stałe, niezależne od pory dnia i roku) zapotrzebowanie na energię elektryczną. Współczesna energetyka wiatrowa i słoneczna nie ma takich możliwości.
- Niskie negatywne oddziaływanie na środowisko podczas normalnej eksploatacji. Brak emisji CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, pyłów. EJ nie powoduje efektu cieplarnianego, nie niszczy warstwy ozonowej, nie powoduje kwaśnych deszczy.

## Argumenty przeciw budowie EJ w Polsce

Argumenty przeciw EJ w Polsce zebrano poniżej.

- Wysokie koszty inwestycyjne EJ 3–5 mld EUR/1000 MW.
- Długi czas realizacji inwestycji w praktyce 6–8 lat (planowy 5 lat).
- Brak sieci przesyłowych najwyższych napięć, konieczność dodatkowych inwestycji i związanych z nimi szkód w środowisku (np. wyręby lasu).
- Niski poziom wiedzy na temat EJ i niski poziom akceptacji społecznej (spowodowany między innymi poważnymi awariami jądrowymi TMI-1979 (USA), Czernobyl-1986 (ZSRR), Fukushima-2011 (Japonia)).
- Duże zagrożenie dla środowiska w sytuacjach awaryjnych. Po 1 roku eksploatacji rdzeń EJ o mocy elektrycznej 1000 MW zawiera blisko 400 izotopów w dużej części promieniotwórczych, których aktywność wynosi ok.  $10^{23}$  Bq (1 Bq = 1 rozpad/s).
- Konieczność długoterminowego zabezpieczania odpadów promieniotwórczych, nawet przez  $10^4$  lat, konieczność budowy składowiska odpadów nisko- i średnio aktywnych równocześnie z budową elektrowni i składowiska odpadów wysokoaktywnych po kilkunastu latach od uruchomienia pierwszego bloku.
- Niższa niż elektrowni konwencjonalnych sprawność termodynamiczna EJ (rzędu 35%) i związane z tym większe zapotrzebowanie na wodę do chłodzenia skraplaczy turbin. Niższa sprawność EJ w porównaniu z elektrownią konwencjonalną jest efektem niższej temperatury pary wodnej na dopływie do turbiny. W typowej elektrowni konwencjonalnej temperatura pary świeżej przekracza  $600^{\circ}\text{C}$ , natomiast w EJ z reaktorami typu PWR lub BWR nie przekracza  $300^{\circ}\text{C}$ .
- Minimalny przepływ wody w rzece dla EJ z reaktorem PWR o mocy elektrycznej 1000 MW wynosi  $125\text{ m}^3/\text{s}$ . Średni przepływ Warty na wysokości Klempicza ma wartość  $118\text{ m}^3/\text{s}$ . Średni przepływ Wisły w Warszawie to  $560\text{ m}^3/\text{s}$ . Ponieważ przepływy minimalne są znacznie mniejsze od średnich to nie mamy w Polsce wystarczająco dużej rzeki do zapewnienia otwartego układu chłodzenia dla EJ z dwoma reaktorami. W przypadku zamkniętego układu chłodzenia, ilość wody konieczna do uzupełniania strat z chłodni kominowych jest ponad 100 razy mniejsza niż dla układu otwartego. Dla EJ o mocy elektrycznej 1000 MW ilość ta wynosi ok.  $1,1\text{ m}^3/\text{s}$ .
- Brak, w aktualnych ofertach dostawców technologii, możliwości skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła. W przypadku kogeneracji (elektryczność + ciepło) możliwy byłby wzrost sprawności z 35% do 50%, a trójgeneracji (elektryczność + ciepło + chłód) nawet do 65%.
- Specyfika percepcji ryzyka. Zdarzenia częste, ale o małych skutkach jednostokowych są łatwiej akceptowane przez ludzi niż zdarzenia rzadkie



o potencjalnie dużych skutkach. Podobnie zdarzenia będące następstwem indywidualnie podjętej decyzji budzą mniejsze opory niż zdarzenia będące efektem decyzji o charakterze społecznym, czyli decyzji na które mieliśmy jedynie częściowy wpływ. Niedobrowolność sytuacji ryzyka czyni postrzegane ryzyko większym. Ryzyko zawsze odbierane jest subiektywnie. Tajemniczość zjawiska, jego naukowa kontrowersyjność zwiększają poziom odczuwanego ryzyka [17].

### **Kwestia gwarancji 100% bezpieczeństwa**

Zdarzeniom jakie mogą wystąpić w przyszłości przypisujemy prawdopodobieństwa ( $p$ ) i skutki ich wystąpienia ( $S$ ). Skutki ( $S$ ) wyrażamy najczęściej w jednostkach pieniężnych. W przypadku awarii, skutek oznacza całkowity koszt jaki będziemy musieli ponieść, aby zlikwidować wszelkie (nie tylko materialne) szkody. Iloczyn prawdopodobieństwa ( $p$ ) wystąpienia awarii i jej skutków ( $S$ ) nosi nazwę ryzyka:  $R = p \times S$ .

Prawdopodobieństwo  $p$  przyjmuje wartości z przedziału otwartego  $(0, 1)$ , bez  $0$  i  $1$ . Oznacza to, że w odniesieniu do przyszłości nie możemy oczekiwać zdarzeń 100% pewnych ( $p = 1$ ), ani całkowicie niemożliwych ( $p = 0$ ). Zatem kolokwialne stwierdzenie „wszystko może się zdarzyć” jest prawdziwe. Nie można całkowicie wykluczyć niebezpieczeństwa wystąpienia awarii i nie można zbudować absolutnie skutecznego systemu bezpieczeństwa. Jest to fizycznie niemożliwe. Innymi słowy, 100% bezpieczeństwa jest nieosiągalne, nie tylko ze względów techniczno-ekonomicznych, ale ze względów fizycznych. Ryzyko możemy minimalizować, ale nie jesteśmy w stanie zmniejszyć go do zera.

W przypadku EJ III generacji podjęto wszelkie technicznie możliwe i ekonomicznie uzasadnione kroki mające na celu uzyskanie maksimum bezpieczeństwa. Niebezpieczeństwo wystąpienia MHA (maksymalnej hipotetycznej awarii) wyliczone metodyką PRA (Probabilistic Risk Assessment) wynosi  $3 \cdot 10^{-7}$ /rok [18].

### **Podsumowanie**

- Nie da się wybudować i uruchomić EJ bez akceptacji społecznej.
- Nie da się zagwarantować 100% bezpieczeństwa żadnego obiektu technicznego.
- Posiadanie EJ nie jest wyznacznikiem poziomu cywilizacyjnego kraju (np. Norwegia, Dania, Włochy, Austria, Portugalia, nie mają EJ, rys. 2).
- Budowa EJ jest szansą na złagodzenie stojących przed Polską problemów energetycznych. Jest szansą na rozwój.

- Presja czasu, wynikająca z aktualnego stanu polskiej energetyki, w najmniejszym stopniu nie może wpływać na obniżenie standardów jakościowych zwłaszcza w zakresie bezpieczeństwa.
- Decyzja o budowie EJ powinna mieć wyłącznie podstawy techniczno-ekonomiczne i w maksymalnym stopniu uwzględniać kwestie ochrony zdrowia i ochrony szeroko rozumianego środowiska.
- Budowa tylko jednej EJ (2 bloki po 1000–1500 MW) jest z ekonomicznego punktu widzenia nieopłacalna.
- Najlepsze warunki do lokalizacji pierwszej EJ w Polsce istnieją na północy kraju – nad morzem. Tylko tam możliwe jest zastosowanie otwartego układu chłodzenia skraplaczy turbin. Jest to rozwiązanie tańsze od układu zamkniętego z chłodniami kominowymi i umożliwia uzyskiwanie większych sprawności ze względu na niższą temperaturę wody chłodzącej skraplacze. Ponadto lokalizacja nad Bałtykiem stwarza możliwość dostaw materiałów budowlanych drogą morską.
- Druga lub ewentualnie trzecia EJ powinna powstać w głębi kraju.
- Gaz łupkowy może okazać się ważną szansą na uniknięcie kłopotów energetycznych w najbliższych kilku latach. Elektrownie gazowe budują się szybko (2–3 lata) i stosunkowo tanio. Jednak koszty ich eksploatacji, ze względu na wysokie ceny gazu, są bardzo wysokie. Uruchomienie kilku elektrowni gazowych przed oddaniem do eksploatacji pierwszych EJ byłoby dobrym rozwiązaniem.
- Lokalizacja Warta-Klempicz jest pod wieloma względami bardzo korzystna.

### **Oficjalna ocena lokalizacji EJ Warta–Klempicz**

Ocenę zawarto w Prognozie Oddziaływania na Środowisko Programu Polskiej Energetyki Jądrowej [13]. Cytaty:

- Oddziaływania związane z budową i eksploatacją elektrowni będą dotyczyły niewielkiej liczby ludności.
- Nie zachodzi potrzeba wysiedleń ludności związanych z budową elektrowni.
- Okolica charakteryzuje się korzystną strefą energetyczną wiatru, dzięki której nie będzie dochodziło do kumulowania się potencjalnych zanieczyszczeń emitowanych z terenu elektrowni oraz z innych obiektów położonych w pobliżu.
- Dzięki położeniu w pobliżu rzeki Warty i wystarczającym zasobom wodnym ( $SSQ = 118 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $SNQ = 53,4 \text{ m}^3/\text{s}$ ) możliwy jest do zastosowania w EJ zamknięty system wody chłodzącej.  $SSQ$  – średnia z przepływów średnich rocznych,  $SNQ$  – średnia z najmniejszych przepływów rocznych.

- Na obszarze przewidzianym pod budowę oraz w jego okolicy brak jest stanowisk archeologicznych, nie zachodzi tu więc zagrożenie naruszenia dóbr kulturowych podczas robót ziemnych.
- W pobliżu planowanej inwestycji nie stwierdzono występowania surowców naturalnych i innych kopalin użytkowych, a więc nie istnieje zagrożenie utrudnienia dostępu i eksploatacji złóż.
- Głębokość do głównego użytkowego poziomu wód podziemnych wynosi od 2 do 5 metrów. Poziomy wodonośne wykazują średnią wrażliwość na zanieczyszczenia.
- Z punktu widzenia bilansu mocy w KSE (Krajowy System Elektroenergetyczny) lokalizacja jest bardzo korzystna, ponieważ w tym rejonie kraju brak jest dużego źródła systemowego. Najbliżej położone elektrownie: Dolna Odra oraz ZE PAK nie stanowią alternatywy dla tej lokalizacji.
- Wybór tej lokalizacji związany jest z potencjalnie negatywnym wpływem na cele ochrony obszaru Natura 2000.
- Lokalizacja pod względem różnorodności flory i siedlisk przeciętna na tle pozostałych, znajduje się jednak w obrębie kompleksu leśnego na Obszarze Chronionego Krajobrazu i z tego względu niekorzystna.

### Uwagi końcowe

- Opinie na temat EJ są silnie emocjonalne i często wynikają z niewiedzy.
- Istnieje ogromne pole do działań informacyjno-edukacyjnych na temat EJ.
- Działania informacyjne nie mogą mieć w żadnym razie charakteru propagandowego.
- W dyskusjach o EJ nie wolno mieszać kompetencji. Jest to kwestia wiarygodności.

### Literatura

- [1] Nuclear Power Plant Information, International Atomic Energy Agency, URL accessed 19, Wina, March 2012.
- [2] Energetyka Jądrowa. Perspektywy rozwoju w Polsce. Raport Polskiego Towarzystwa Nukleonicznego, W-wa, 2009.
- [3] Murray R. L., Nuclear Energy. Systems, and Applications of Nuclear Processes. (6th Ed.). Elsevier BH, Amsterdam, 2009.
- [4] www.areva.com. Image courtesy of Areva.
- [5] www.ap1000.westinghousenuclear.com.
- [6] Strupczewski A., Nie bójmy się energetyki jądrowej. Stowarzyszenie Ekologów na Rzecz Energii Nuklearnej SEREN, W-wa, 2010.

- [7] Wpływ energetyki jądrowej na polską gospodarkę. Próba oszacowania. Raport Narodowego Centrum Badań Jądrowych (NCBJ), Otwock-Świerk, 2011.
- [8] AREVA: U.S. EPR – First generation III reactor under construction in Finland and France. Image courtesy of Areva.
- [9] Nuclear Energy. Just the Facts. NEI (Nuclear Energy Institute), Washington DC 2011.
- [10] Nuclear energy in Finland. Ministry of Employment and Economy (MEE) of Finland. Energy Department, Helsinki, 2011.
- [11] Studium BSiPE·Energoprojekt, Warszawa 2006 (z późniejszymi korektami).
- [12] Ramowy harmonogram działań dla energetyki jądrowej. Minister Gospodarki, W-wa, 2009.
- [13] Prognoza oddziaływania na środowisko programu polskiej energetyki jądrowej Ministerstwo Gospodarki, Departament Energii Jądrowej, W-wa, 2011.
- [14] <http://dlaklimatu.pl/UE-a-pakiet-energetyczno-klimatyczny>.
- [15] DOE NP2010 Nuclear Power Plant Construction Infrastructure Assessment, US DOE, Washington D.C., 2005.
- [16] R. L. Long: „Education & Training for the NPP Workforce”, Międzynarodowa Konferencja Elektrownie Jądrowe dla Polski, Warszawa, 1–2 czerwca 2006.
- [17] Jaracz P. Percepcja społeczna ryzyka jądrowego. Państwowa Agencja Atomistyki, Departament Nauki, Szkolenia i Informacji Społecznej. Referat na Kongresie Elektryki Polskiej, SEP, W-wa 2–4.09.2009.
- [18] U.S. NRC United States Nuclear Regulatory Commission, <http://www.nrc.gov>.