



Energia jądrowa

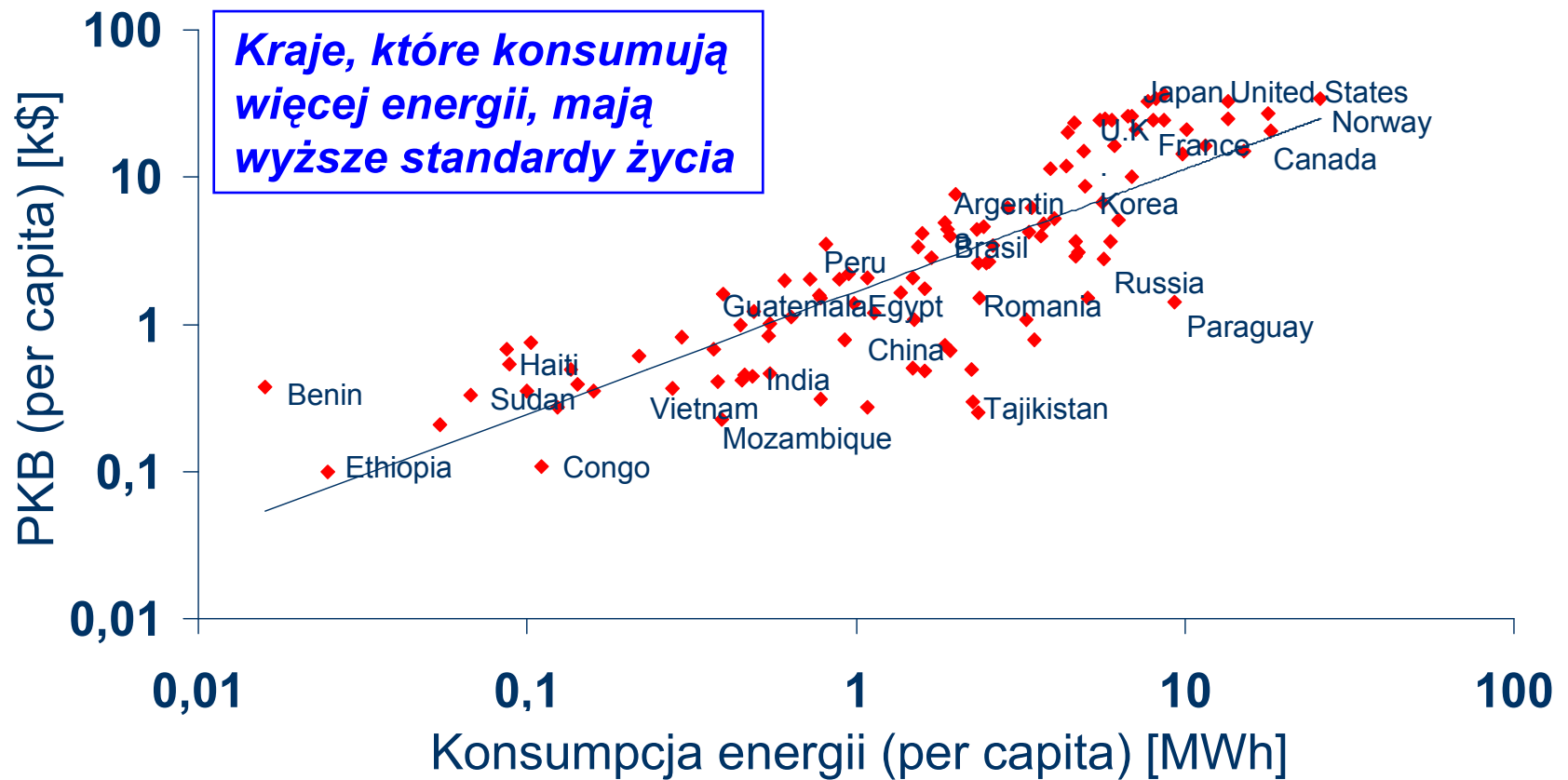


Fakty i mity

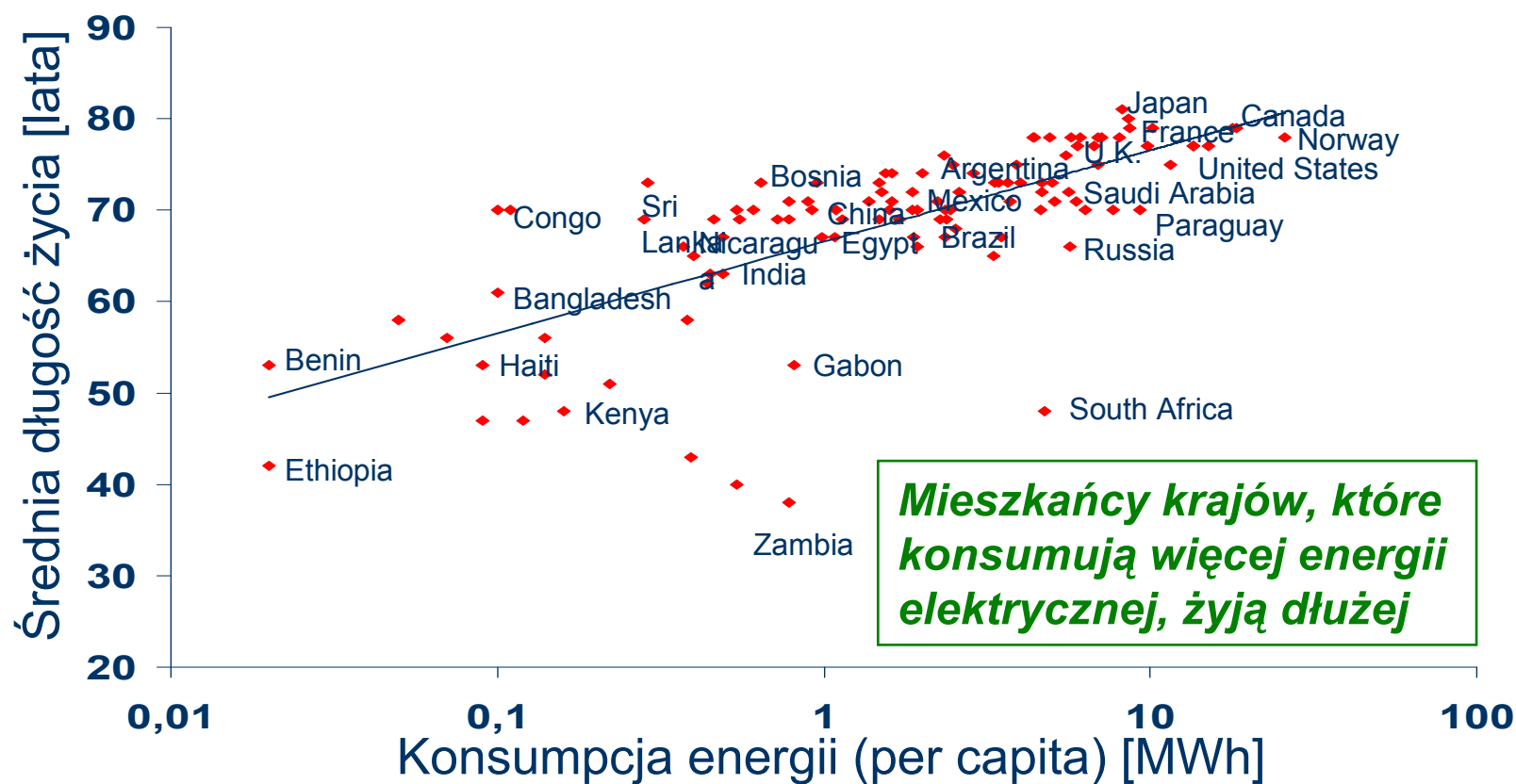
Dlaczego temat: ENERGIA ?

- Globalna degradacja środowiska na Ziemi – w części wywołana przez naszą cywilizację – jest faktem
- Cywilizacja, aby przetrwać i się rozwijać, dramatycznie potrzebuje źródeł „taniej” i „czystej” energii
- Podstawowe, używane obecnie źródła energii, są nie tylko „brudne”, ale i na wyczerpaniu

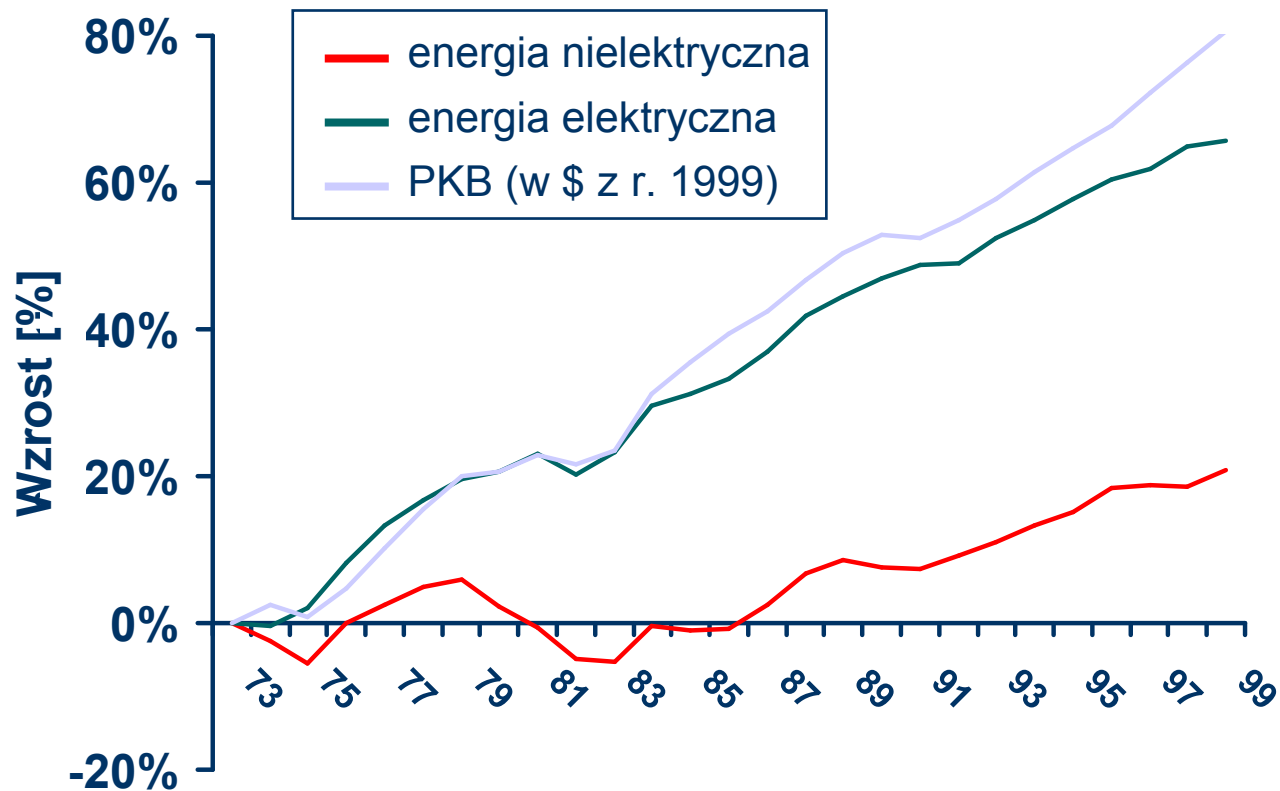
Wydajność ekonomiczna a konsumpcja elektryczności



Przewidywana średnia długość życia a konsumpcja elektryczności



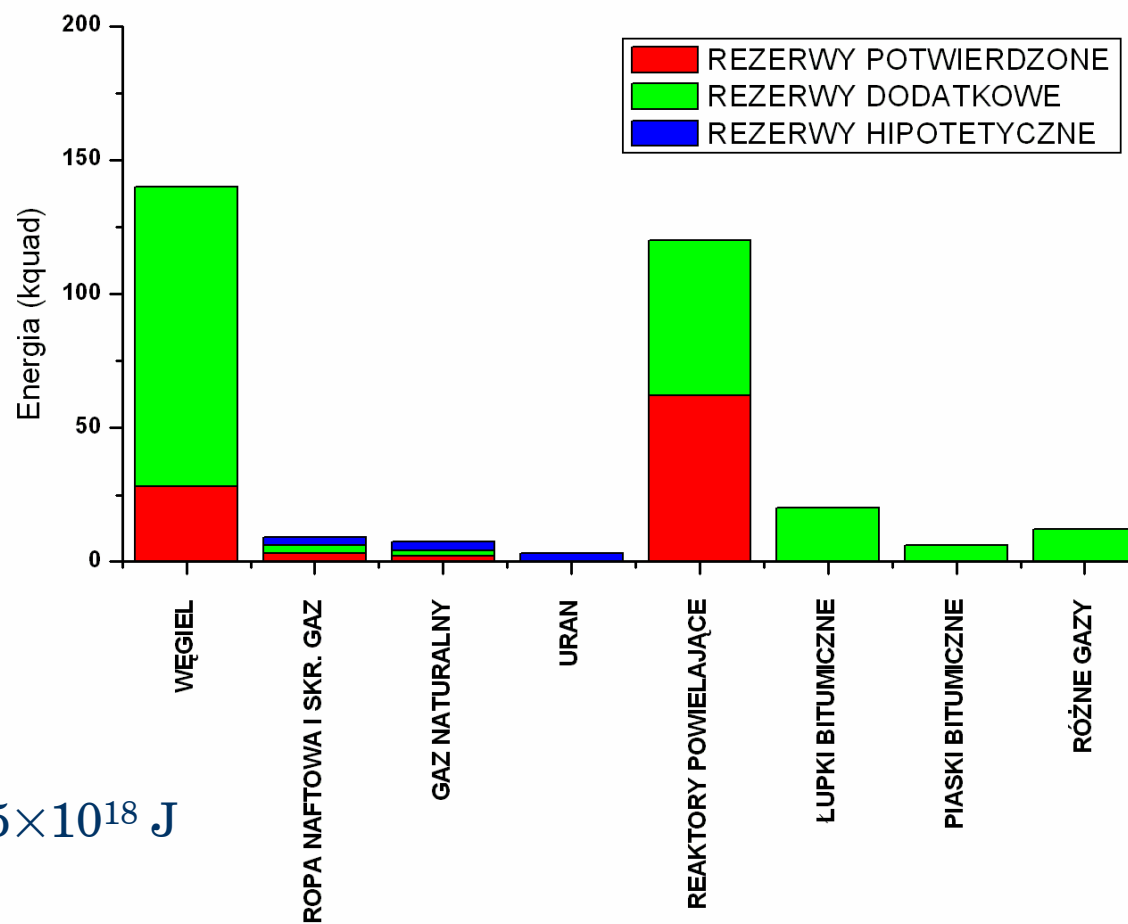
USA: trend w konsumpcji energii i wzroście zamożności



Skąd brać energię ?

$$E = mc^2$$

Rezerwy paliw kopalnych na Ziemi



1 quad = 1.055×10^{18} J

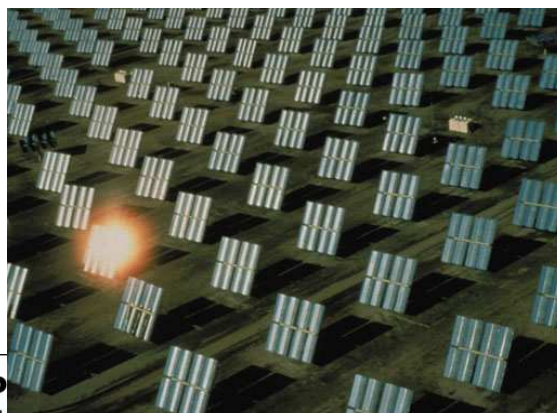
Energia wodna



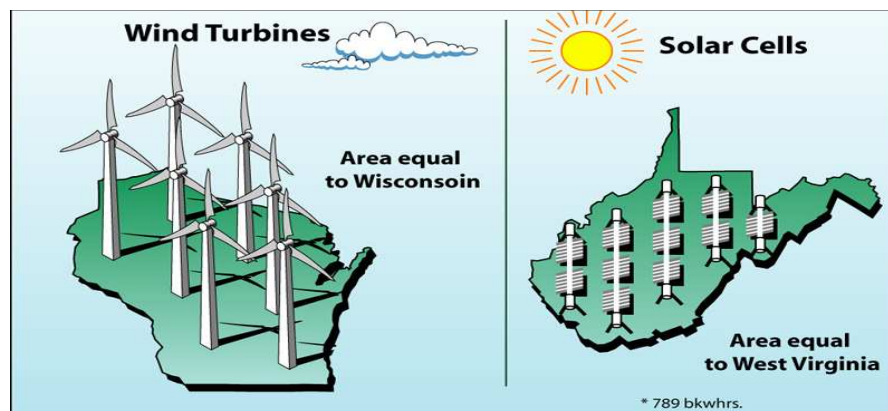
Np. w USA tylko 7% energii elektrycznej jest pokrywanych z zasobów wodnych

Poważne konsekwencje dla środowiska !

Alternatywne źródła energii „odnawialnej”



5×



Niezbędna powierzchnia, aby potrzeby USA na energię elektryczną pokryć z tych źródeł

Dlaczego energia jądrowa?

- Są jeszcze duże zasoby uranu (dla reaktorów powielających)
- Jest tania
- Jest „czysta” i przyjazna środowisku naturalnemu; nie powoduje emisji CO₂

“We have no time to experiment with visionary energy sources; civilization is in imminent danger and has to use nuclear—the one safe, available, energy source—now or suffer the pain soon to be inflicted by our outraged planet.”

***— James Lovelock
Leading Environmentalist
May 2004***



Nie mamy czasu, aby eksperymentować z wizjonerskimi źródłami energii; cywilizacja jest w nieuchronnym niebezpieczeństwie i musi wykorzystać energię jądrową – obecnie jedyne bezpieczne i dostępnego źródło energii – lub w najbliższej przyszłości ponieść dotkliwą karę wymierzoną przez naszą obrażoną planetę

USA: koszt energii elektrycznej z elektrowni jądrowych

Średnia roczna w centach (2004)
za kWh



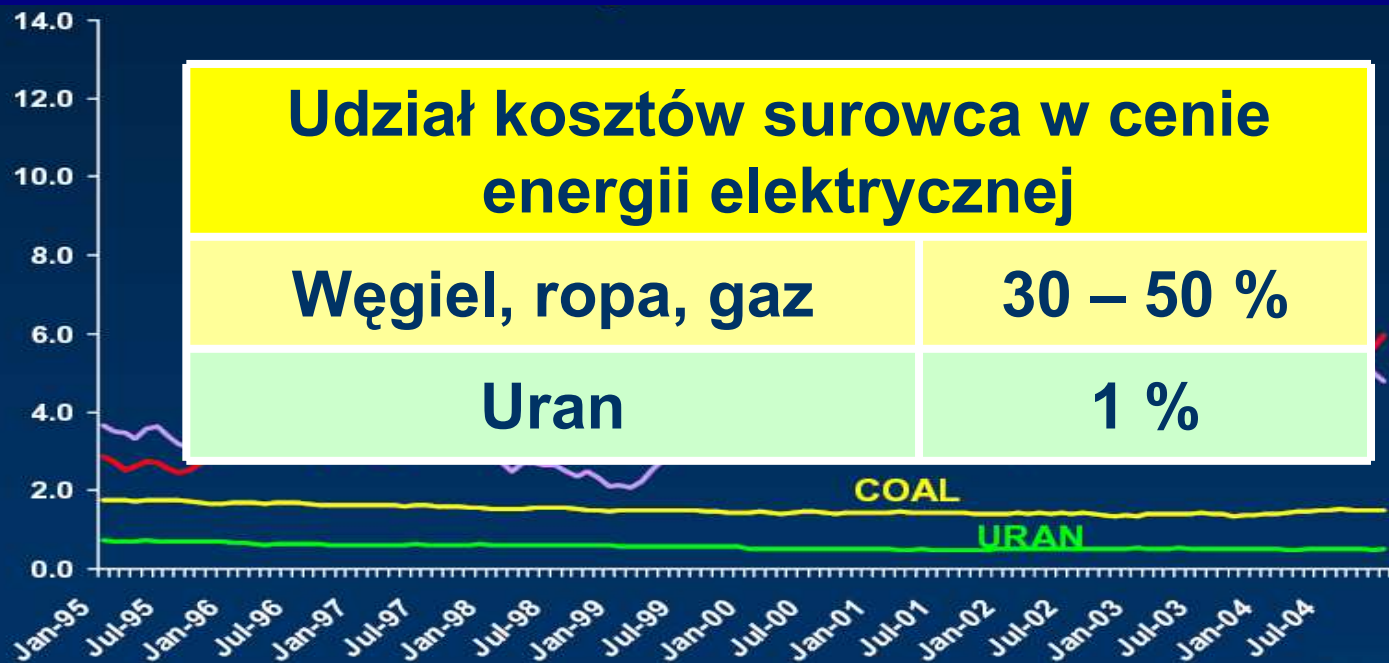
Production Costs = Operations and Maintenance Costs + Fuel Costs

Source: EUCG - Updated 6/05



USA: Ceny paliw do produkcji energii elektrycznej

Średnia miesięczna w centach (2004) za kWh



Source: Energy Velocity Updated 5/05



Energia jądrowa jest przyjazna środowisku



Czernobyl ?



Rozszczepienie jąder

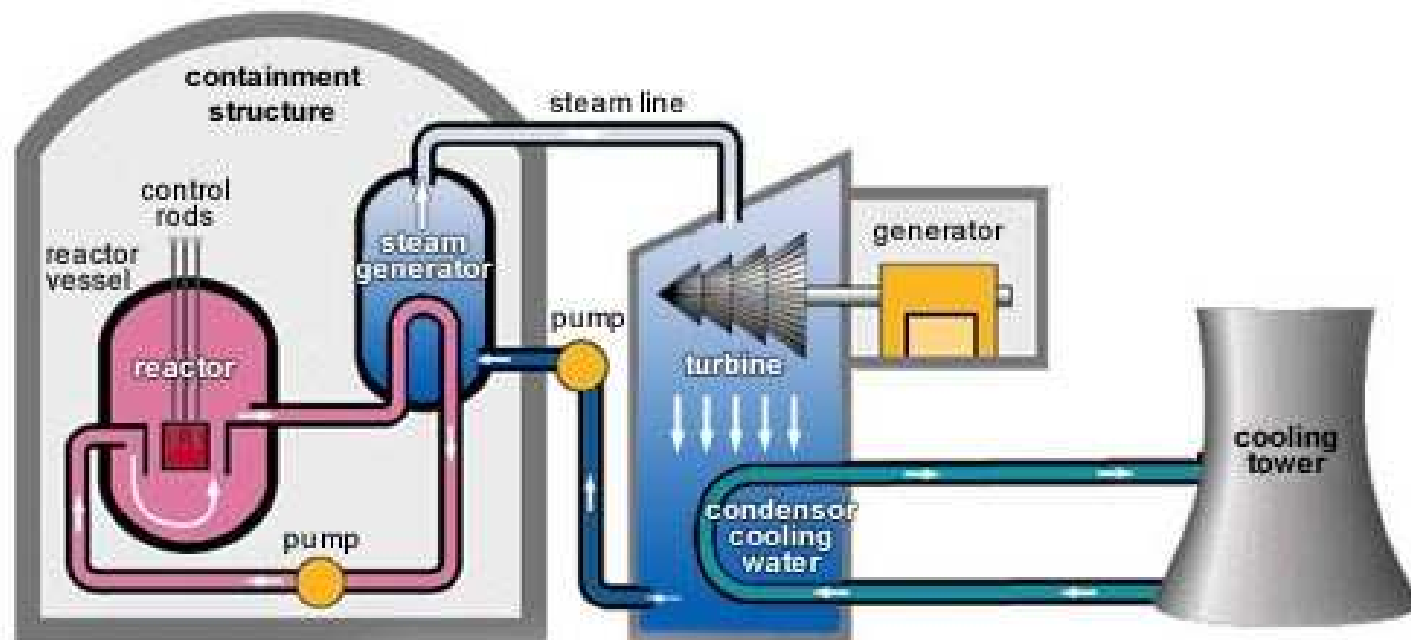
- ❑ Suma mas produktów rozszczepienia jest mniejsza niż suma mas jądra rozszczepialnego i neutronu
- ❑ Energia wyzwala się w postaci ciepła (energia kinetyczna produktów rozszczepienia; około 200 MeV na jedno rozszczepienie)
- ❑ Uwolnione neutrony inicjują kolejne rozszczepienia (reakcja łańcuchowa)
- ❑ Energia cieplna odprowadzana jest z reaktora przez chłodziwo (woda, gaz, ciekły metal)



Reaktory jądrowe

- ❑ **Reaktor jądrowy, to urządzenie, które realizuje w sposób kontrolowany samopodtrzymującą się łańcuchową reakcję rozszczepienia**
- ❑ **Rodzaje reaktorów jądrowych:**
 1. **Termiczne:** wykorzystujące moderatory (grafit, H₂O, D₂O) do spowolnienia neutronów do energii termicznych, potrzebnych następnie do stymulowania rozszczepienia. Rozszczepienie produkuje neutrony prędkie, które z kolei są spowalniane itd.
 2. **Prędkie:** proces powielania neutronów odbywa się przy energiach wyższych niż 1 MeV.
- ❑ **Reaktory komercyjne i do celów naukowych, to reaktory termiczne**

Reaktor jądrowy



Paliwo jądrowe

❑ Reaktory konwencjonalne:

1. Paliwo stanowią tu nieparzyste (N) izotopy uranu (^{233}U , ^{235}U) lub plutonu (^{239}Pu , ^{241}Pu)
2. Tylko powyższe izotopy wnoszą pozytywny wkład do reaktywności systemu, przy zmieniającym się składzie izotopowym elementów paliwowych

❑ Reaktory powielające:

1. Parzyste izotopy (^{232}Th , ^{234}U , ^{238}U , ^{240}Pu) nie ulegają rozszczepieniu pod wpływem neutronów termicznych (energia pairingu), ale produkują (przez wychwyt) izotopy nieparzyste
2. Wydajność powielania paliwa („**breeding**”) jest zdefiniowana jako stosunek liczby wyprodukowanych jąder rozszczepialnych do liczby zużytych w jednym cyklu jąder paliwa

Paliwo jądrowe

□ Reaktory powielające (c.d.):

1. Najkorzystniejsze jest powielanie materiału rozszczepialnego przy pomocy neutronów prędkich (1 keV – 10 MeV) przez zamianę ^{238}U na ^{239}Pu . Wydajność powielenia wynosi około 1.4. Taki system należy do klasy tzw. „**prędkich reaktorów powielających**”.
2. Powielanie przy pomocy neutronów termicznych ($^{232}\text{Th} \rightarrow ^{233}\text{U}$) jest znacznie mniej wydajne, ale rozważane w kontekście idei budowy bezpiecznych i tanich reaktorów podziemnych

□ Reaktory wykorzystujące rozszczepienie pod wpływem neutronów prędkich są w fazie prób prototypów

Paliwo jądrowe

❑ Rozpowszechnienie uranu w skorupie ziemskiej

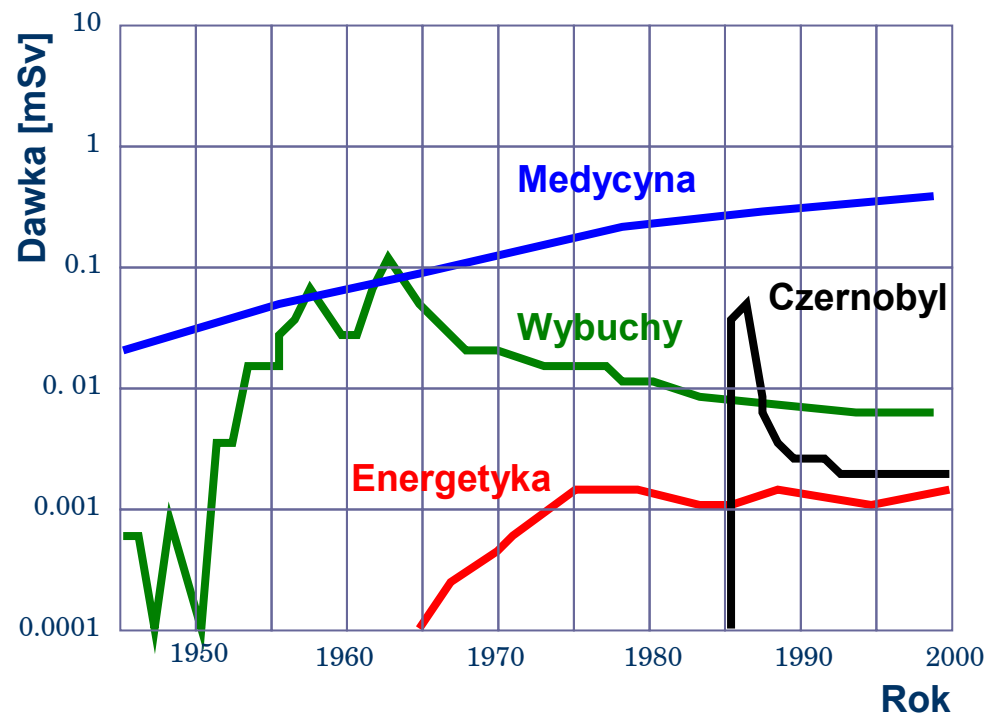
- a) Tak samo pospolity jak cynk i ołów; średnia zawartość w skorupie ziemskiej wynosi **2.8 ppm**
- b) Szacuje się że w górnej warstwie skorupy ziemskiej (36 km) znajduje się około **5×10^{13} t** uranu
- c) Występuje w rudach o niskiej koncentracji (inaczej niż inne metale)

❑ Toksyczność uranu

- a) Zubożony uran nie stanowi zagrożenia radioaktywnego dla organizmów żywych
- b) Jest trujący chemicznie, podobnie jak inne metale ciężkie, gromadzi się w nerkach i tkance kostnej
- c) Każdy człowiek przyjmuje dziennie (z pożywieniem) średnio $2 \mu\text{g}$ uranu
- d) Średnia zawartość uranu w organizmie wynosi $90 \mu\text{g}$

Wpływ elektrowni jądrowej na otoczenie

- ❑ Najbardziej narażony na promieniowanie jest personel elektrowni jądrowych
- ❑ Roczna dawka dla personelu elektrowni jądrowych jest podobna do dawki otrzymywanej przez załogi samolotów pasażerskich
- ❑ Udział energetyki jądrowej w całkowitym narażeniu człowieka na skutki promieniowania jonizującego jest znikomy



Wpływ elektrowni jądrowej na otoczenie (c.d.)

- ❑ Odpady radioaktywne są związane z całym cyklem (produkcja paliwa; produkcja energii, utylizacja zużytego paliwa, likwidacji elektrowni)
- ❑ **Toksyczność odpadów radioaktywnych maleje z czasem**
- ❑ **Toksyczność odpadów z elektrowni konwencjonalnej nie zmienia się**
- ❑ **Elektrownia jądrowa nie wytwarza CO₂, CO, SO₂, NO_x**
- ❑ Rocznie do atmosfery ludzkość emituje ok. **20'000'000'000** ton CO₂
- ❑ Śmiertelność spowodowana chorobami wywołanymi gazami odłotowym w samych Stanach Zjednoczonych wynosi ok. **30'000** zgonów rocznie
- ❑ **80 km od nowoczesnej elektrowni węglowej – trzykrotnie większa dawka promieniowania niż od elektrowni jądrowej**

Wpływ elektrowni jądrowej na otoczenie (c.d.)

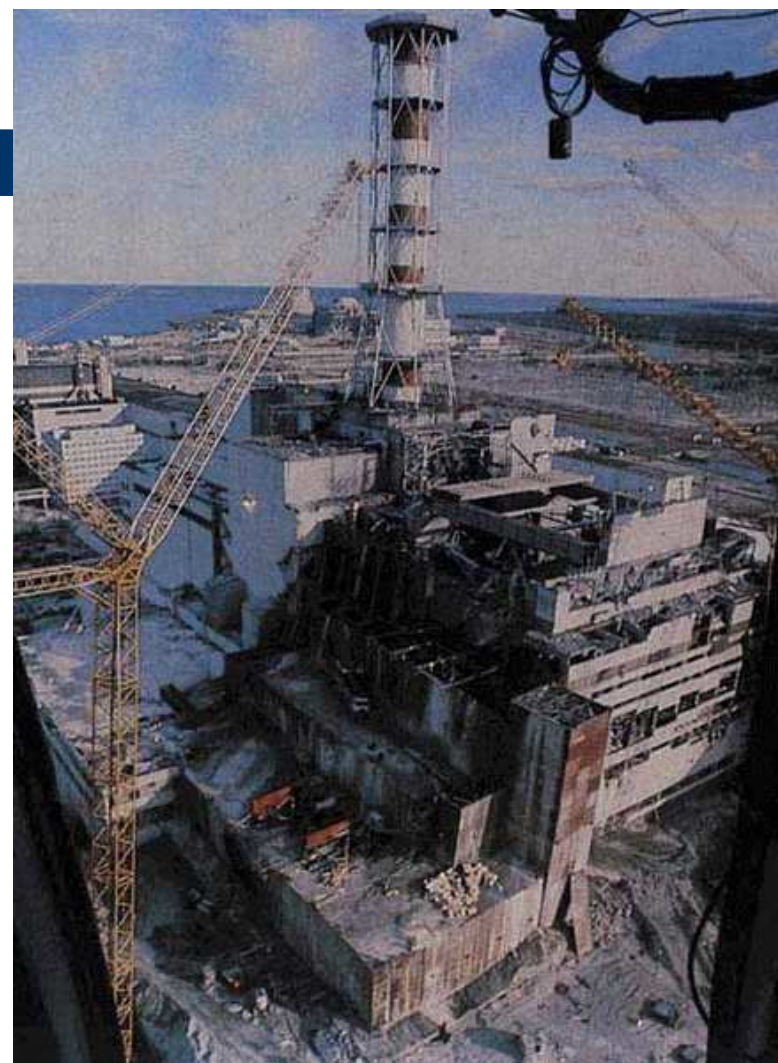
- ❑ **Składowanie odpadów radioaktywnych nie jest skażeniem na wielką skalę - skorupa ziemska sama zawiera olbrzymie ilości substancji radioaktywnych**
- ❑ **Efekty długoterminowe składowania odpadów należy rozważyć w kontekście innych, nieuniknionych katastrof (zmiany klimatu, meteoryty, itp.)**
- ❑ **Zawartość nieprzydatnych (obecnie) substancji radioaktywnych ze zużytego paliwa jądrowego wynosi około 3%; objętość odpadów można zatem radykalnie zmniejszyć w procesie przetwarzania**

Awarie w elektrowniach jądrowych

Reaktor	NRX	Windscale-1	SL-1	Lucerna	Browns Ferry-1	TMI-2	Chernobyl-4
Kraj	Kanada	Wielka Brytania	USA	Szwajcaria	USA	USA	ZSRR
Przeznaczenie	badawczy	produkcyjny (Pu)	doświadczalny	doświadczalny	energetyczny	energetyczny	energetyczny + Pu
Sposób wykorzystania	cywilny	wojskowy	wojskowy	cywilny	cywilny	cywilny	ccwilno-wojskowy
Typ	-	-	-	-	BWR	PWR	RBMK
Rok uruchomienia	1947	1951	1958	1968	1974	1978	1983
Rok awarii	1952	1957	1961	1969	1975	1979	1986
Moc cieplna [MW]	40	?	3	30	3300	2770	3200
Moderator	D ₂ O	grafit	H ₂ O	D ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	grafit
Chłodziwo	H ₂ O	powietrze	H ₂ O	CO ₂	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O
Typ awarii	nadkrytyczność	pożar	nadkrytyczność	blokada chłodzenia	pożar	stopienie rdzenia	pożar
Stan rdzenia po awarii	zniszczone 22 el. paliwowe	uszkodzonych 150 el. paliwowych	stopionych 20% el. paliwowych	zniszczone 1 el. paliwowy	bez uszkodzenia	zniszczone	zniszczone
Bezpośrednie ofiary śmiertelne	0	0	3	0	0	0	31

Awaria w Czernobylu (ZSRR) 1986 r.

- ❑ **Reaktor typu RBMK:**
 - Bezpośrednia przyczyna awarii – bezgranicznie głupie i nieodpowiedzialne eksperymenty prowadzone na nocnej zmianie
 - Uruchomiono łańcuch zdarzeń prowadzący do wzrostu temperatury (do 5000 °C) i mocy (kilkaset razy)
 - Podwójny wybuch wodoru (gaz wodny, reakcja $H_2O + C$)
 - Pożar 2000 t grafitu
 - Stopienie rdzenia
 - Odrzucenie osłony betonowej komory reaktora



Awaria w Czernobylu (ZSRR) 1986 r.

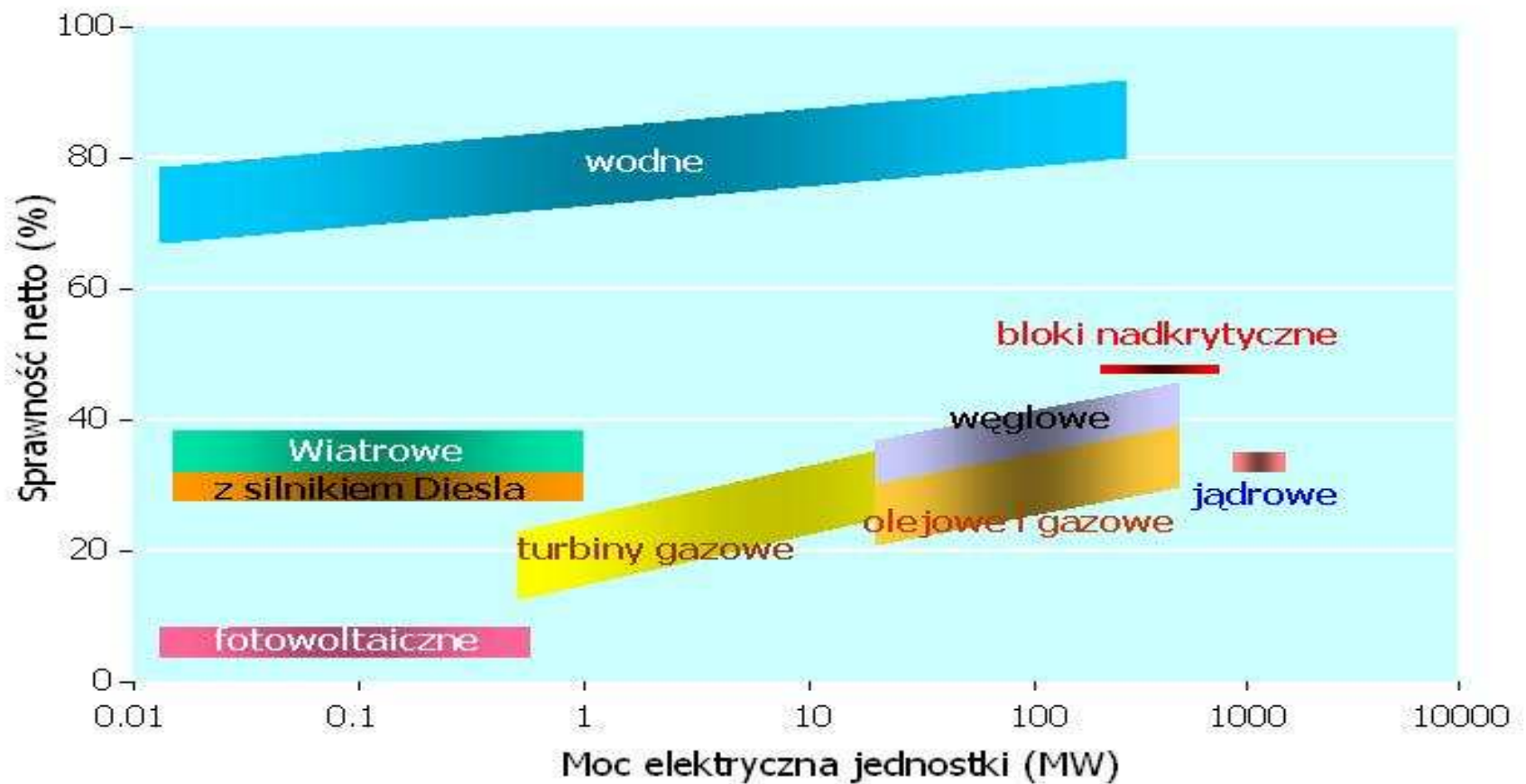
□ Skutki:

- Po awarii z uszkodzonego reaktora wydzielano się 78 MW ciepła (pożar grafitu, reakcje chemiczne, rozszczepienie)
- Do atmosfery przedostało się 10^{19} Bq substancji promieniotwórczych na znaczne wysokości
- Opad radioaktywny (^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs) w 70% przypadków na Białoruś,; reszta rozdzieliła się na Ukrainę, Rosję i pozostałe kraje Europy
- Bezpośrednie narażenie 5'000'000 osób
- 24'000 osób otrzymało dawkę 450 mSv (tzw. życiowa); 45'000 – 30 mSv (bardzo małe dawki mimo gigantycznego skażenia – 30'000 km² zostały skażone aktywnością 150 – 1500 kBq)
- Strefa zamknięta w promieniu 30 km
- W wyniku eksplozji życie straciły 2 osoby, a 1 zmarła na atak serca
- 28 strażaków zmarło w wyniku choroby popromiennej

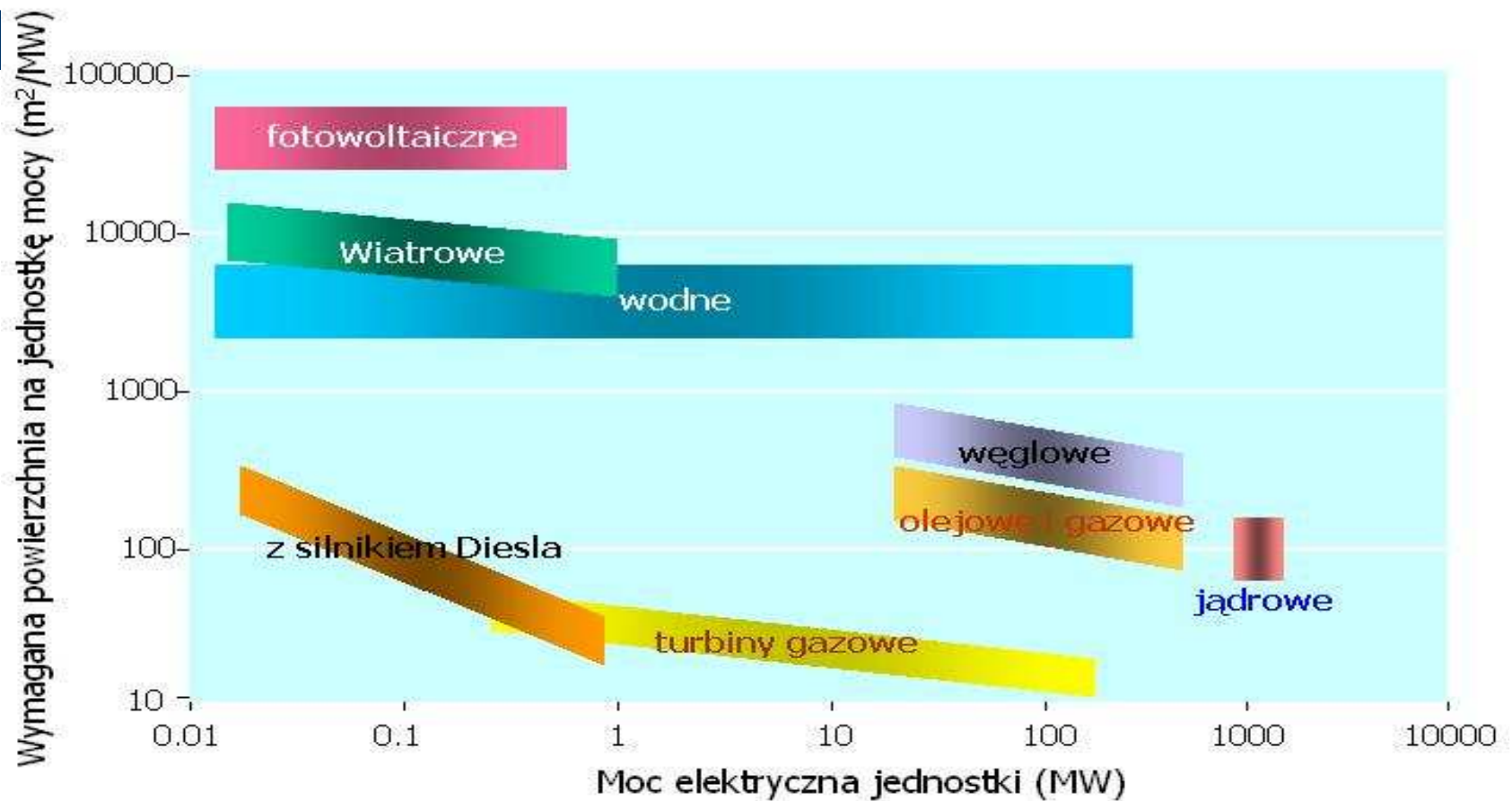
Awaria w Czernobylu (ZSRR) 1986 r.

- ❑ **Polityczno-socjologiczne:**
 - Skutki nie respektują granic państwowych
 - Konieczne są stałe inwestycje w infrastrukturę i nowe technologie jądrowe
 - Wiarygodność energetyki jądrowej i jej społeczna akceptacja wymagają pełnej przejrzystości i informacji o ewentualnych zaistniałych zagrożeniach

Sprawność elektrowni



Wskaźnik zużytej powierzchni



Porównanie elektrowni węglowej Opole z jądrową Beznau



Elektrownia węglowa Opole

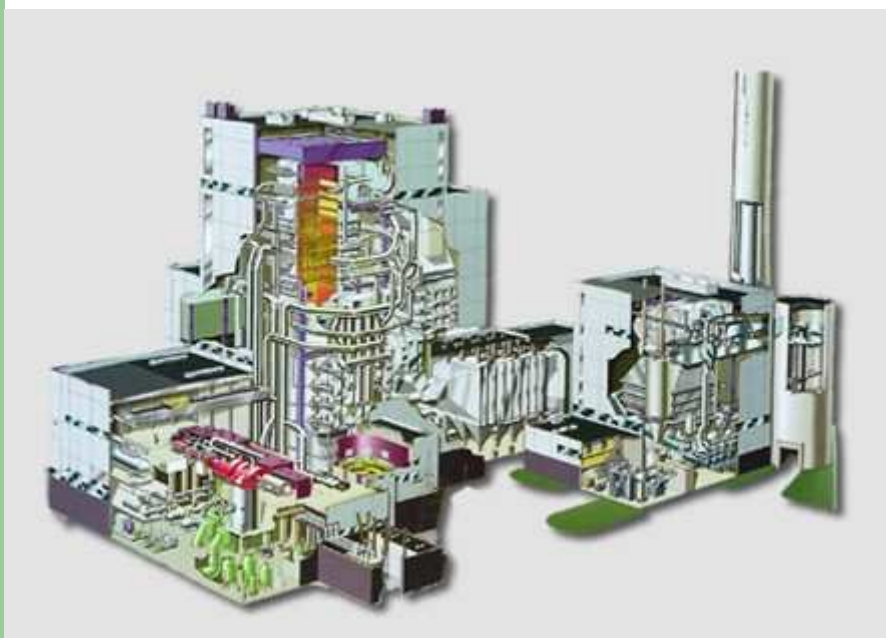
Elektrownia jądrowa Beznau



Elektrownia węglowa Opole



9 km na północ od Opola nad rzeką Mała Panew



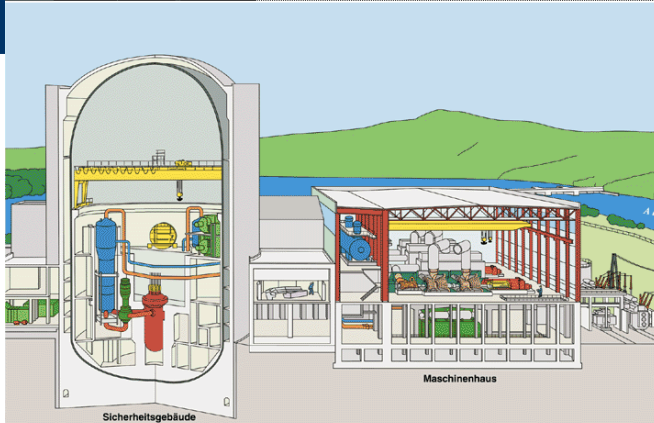
Węglowy blok energetyczny
o mocy 470 MW



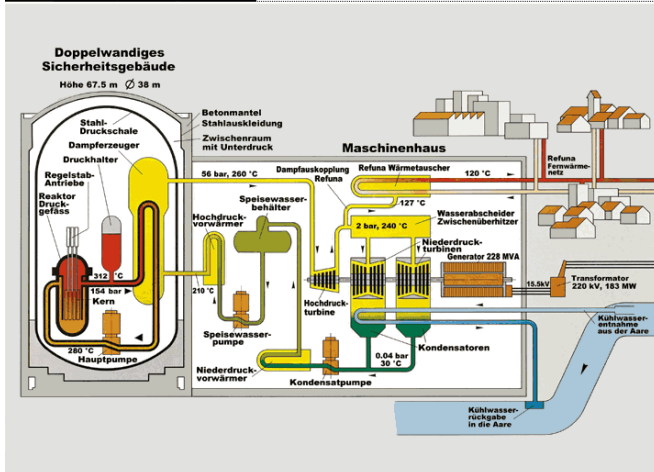
Elektrownia jądrowa Beznau



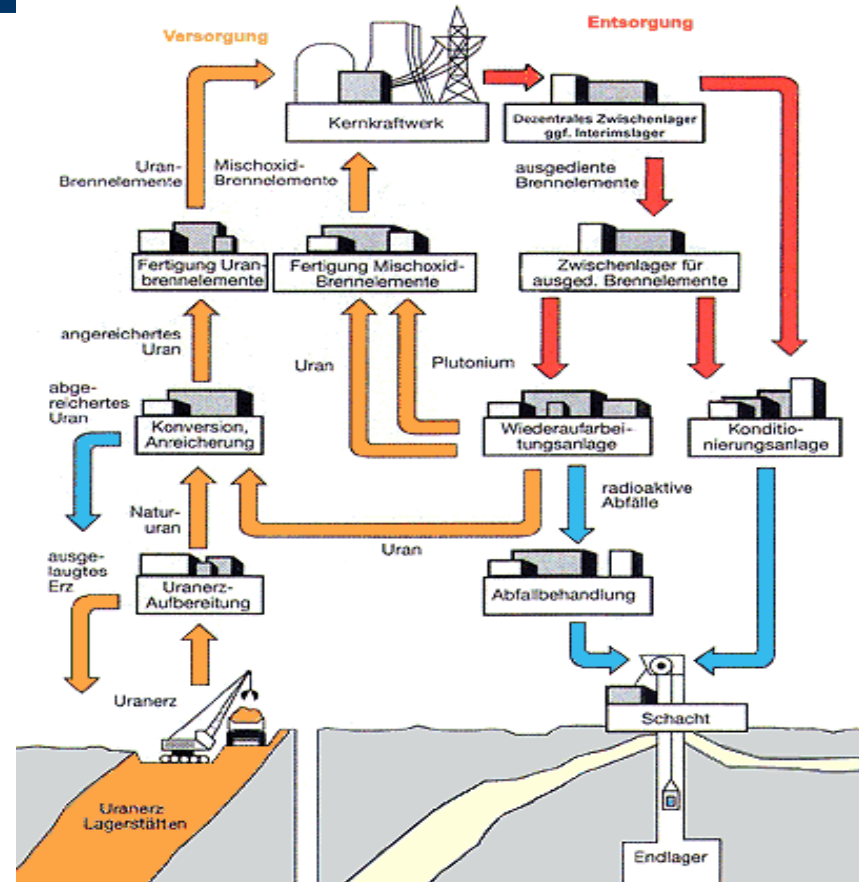
KERNKRAFTWERK BEZNAU



KREISLAUFSHEMA KERNKRAFTWERK BEZNAU



BRENNSTOFF-KREISLAUF



Porównanie elektrowni węglowej Opole i jądrowej Beznau

	Opole	Beznau
Typ bloku	BP-1150	PWR
Moc elektryczna	360 (brutto)	360 (netto)
Moc termiczna	925 MW	1130 MW
Woda zasilająca T/P	255 °C / 21.0 MPa	285 °C / 15.5 MPa
Para/woda na wyjściu z kondensatorów T/P	540 °C / 18.3 MPa	315 °C / 15.5 MPa 270 °C / 5.5 MPa
Ilość pary na turbinę	1150 t/h	2 x 1152 t/h
Ilość wytwornic pary	-	2 pionowe
Wysokość bloku	102 m	67 m
Powierzchnia zabudowy	96 ha (6 bloków)	6 ha (2 bloki)
Roczna ilość surowców	<ul style="list-style-type: none"> ❑ 32'500 t (mączka wapienna) ❑ 1'000'000 t (węgiel) 	<ul style="list-style-type: none"> ❑ 39.5 t (wsad) ❑ 13 t (zużycie)

Porównanie elektrowni węglowej Opole i jądrowej Beznau (c.d.)

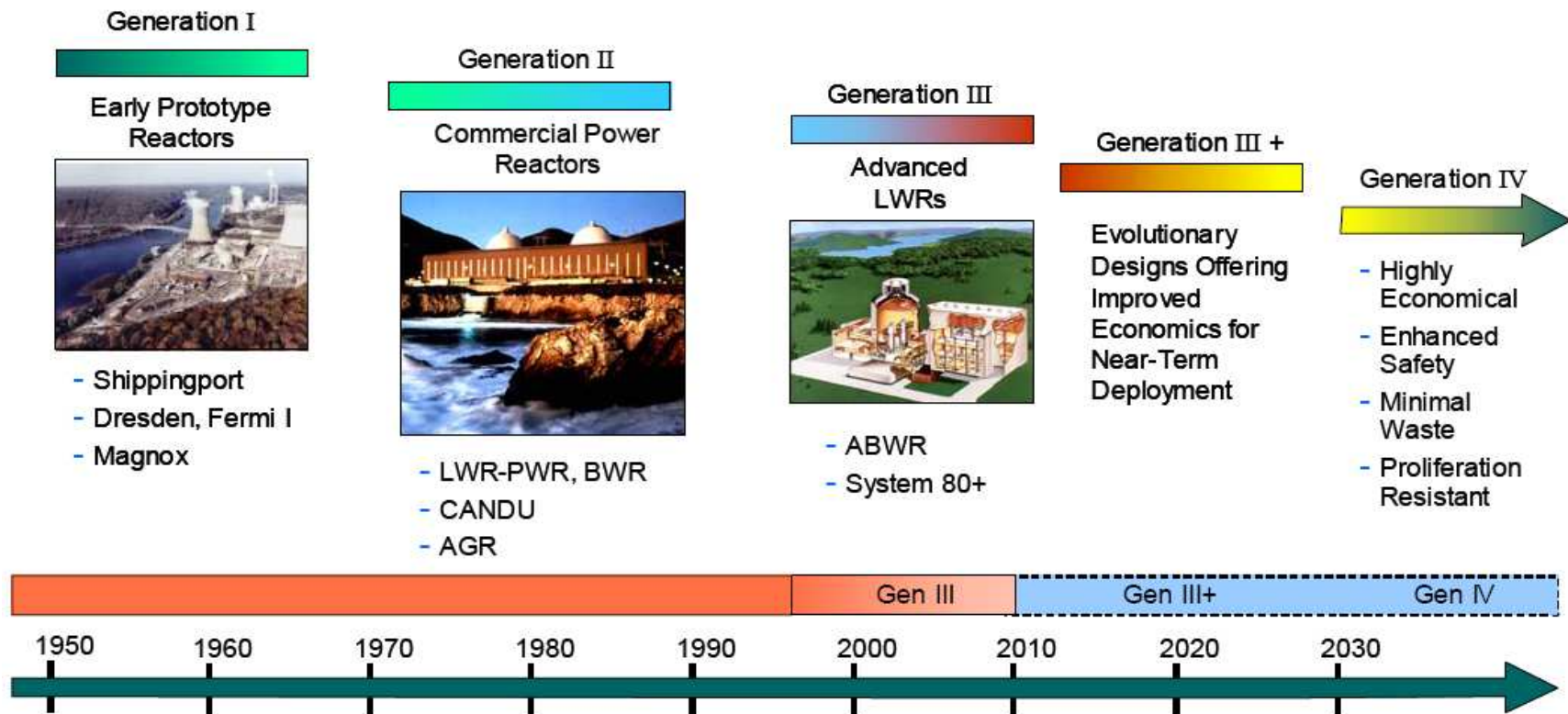
	Opole	Beznau
Roczna ilość odpadów	<ul style="list-style-type: none"> ❑ 190'000 t (popiół i żużel) ❑ 45'500 t (gips) ❑ 2'000'000 t CO₂ ❑ 200 t CO ❑ 3'600 t NO₂ ❑ 3'000 t SO₂ i SO 	<ul style="list-style-type: none"> ❑ 0.8 m³ odpadów wysokoaktywnych ❑ 50 beczek odpadów średnioaktywnych ❑ 100 beczek odpadów niskoaktywnych
Obiekty i urządzenia specyficzne dla danego typu bloku	<ul style="list-style-type: none"> ❑ Rozbudowany układ transportu kolejowego ❑ Obiekty nawęglania ❑ Obiekty odpopielania ❑ Instalacje powietrza ❑ Instalacje spalin ❑ Instalacja odsiarczania ❑ Komin (250 m) 	<ul style="list-style-type: none"> ❑ Szczelny budynek reaktora ❑ Basen do przechowywania wypalonego paliwa ❑ Magazyn odpadów nisko- i średnioaktywnych ❑ Wytwornice pary
Zatrudnienie	1'500 osób (4 bloki)	460 osób (2 bloki)

Reaktory jądrowe IV generacji

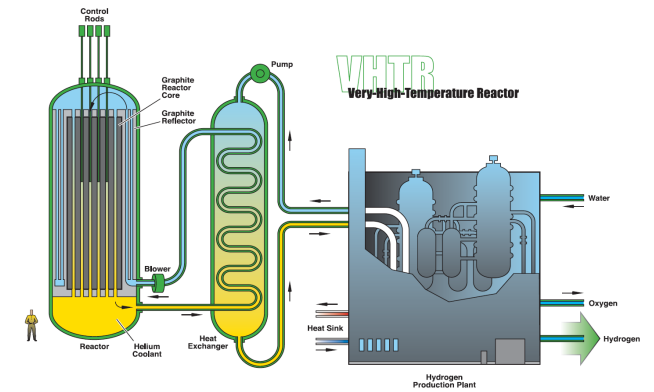
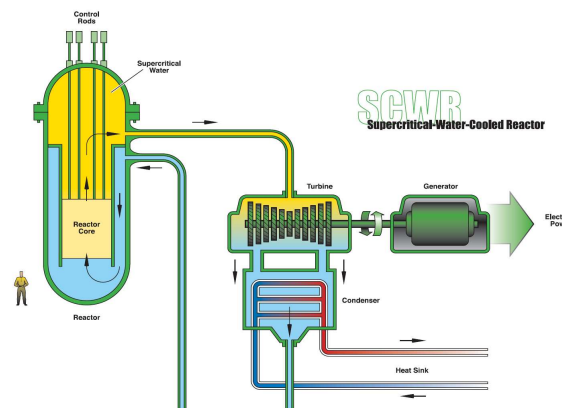
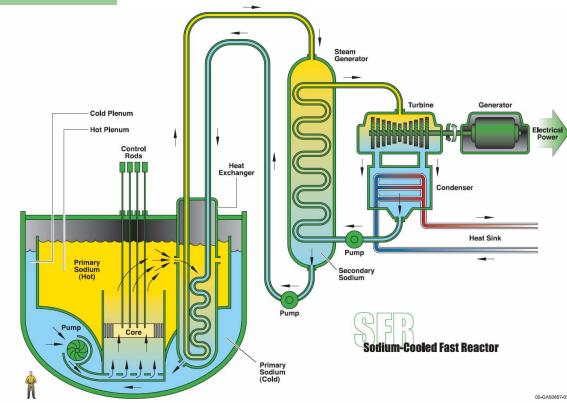
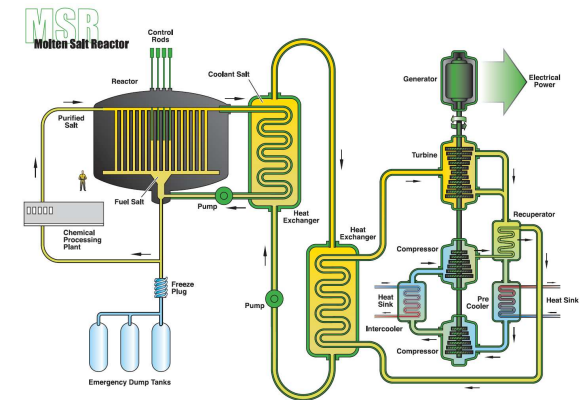
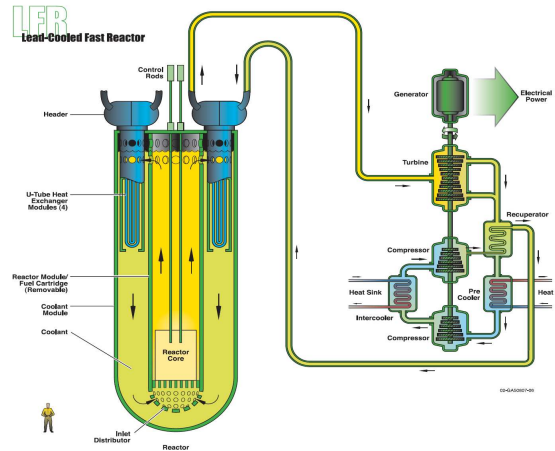
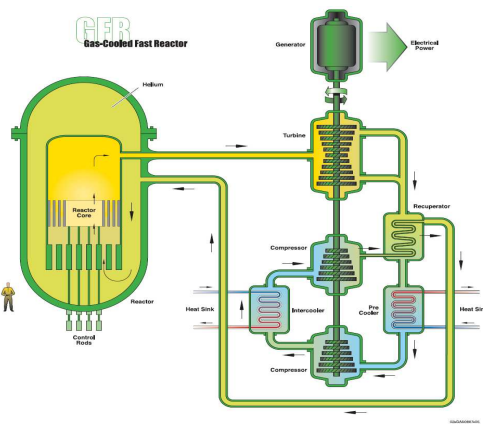
Ten Nations Preparing Today for Tomorrow's Energy Needs



Etapy rozwoju technologii reaktorowej



GenIV: wstępny wybór obiecujących rozwiązań



Główne zadania systemów GenIV

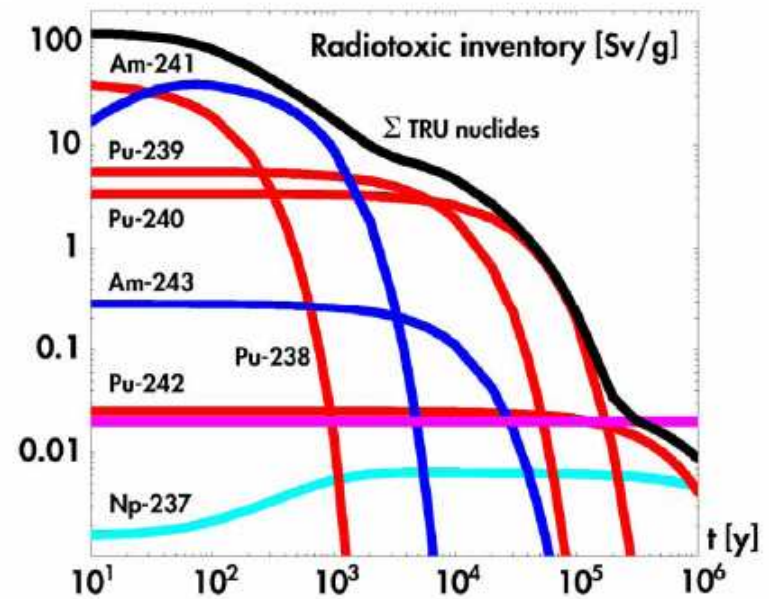
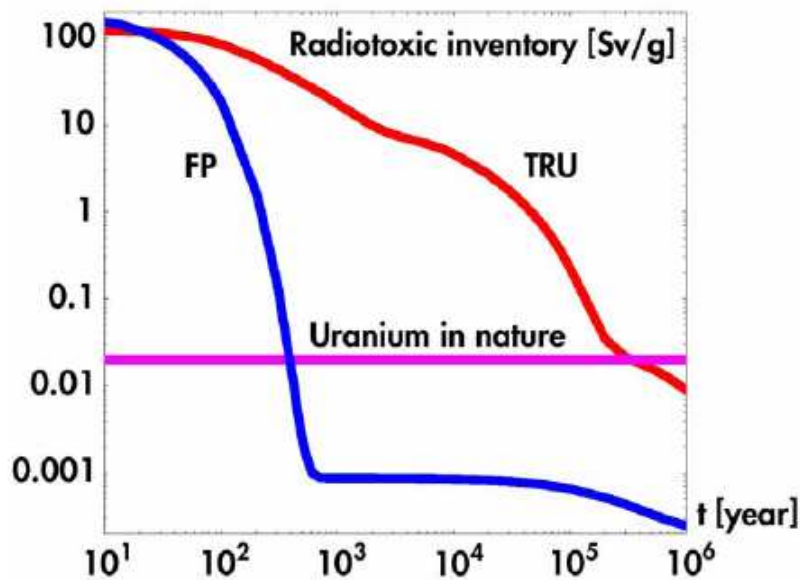
- Partycypujące kraje chcą zachować autonomię w implementacji swoich priorytetów i wyborze systemu
- Zidentyfikowano trzy obszary zastosowań systemów GenIV przez kraje członkowskie:

	Produkcja elektryczności	Obydwie	Produkcja wodoru
1. Produkcja elektryczności			
2. Produkcja wodoru	– SCWR	– GFR	– VHTR
3. Zagospodarowanie aktywnoców	– SFR	– LFR – MSR	

500°C — Temperatura wyjściowa → 1000°C

Unieszkodliwianie odpadów radioaktywnych

- Czasy życia izotopów w odpadach z reaktora lekko-wodnego:



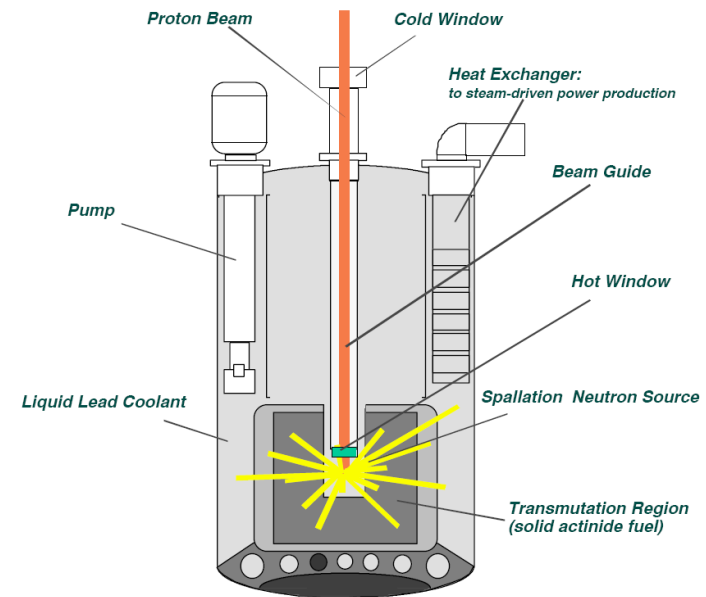
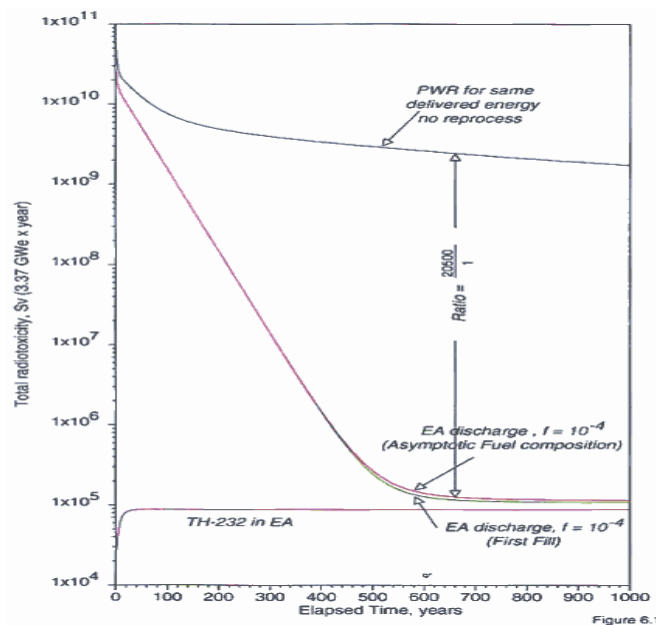
Unieszkodliwianie odpadów radioaktywnych - transmutacja

- ❑ „**Transmutacja**” to proces, w którym długożyciowy izotop promieniotwórczy ulega przemianie na izotop stabilny, albo na krótkożyciowy
- ❑ Transmutacji dokonuje się zazwyczaj po to, aby zmniejszyć „toksyczność odpadów radioaktywnych, tzn. wytworzyć produkty o istotnie krótszym czasie zaniku i zmniejszyć ryzyko i koszty przechowywania odpadów radioaktywnych

Accelerator Driven System („Wzmacniacz Energii”)

□ Komponenty ADS:

- **Akcelerator** protonów o energii ~ 1 GeV i mocy wiązki 5-40 MW
- **Transmuter** – reaktor podkrytyczny ze spalacyjnym źródłem neutronów



Kontrolowana fuzja jądrowa

- ❑ Jądra lekkich pierwiastków mogą się łączyć zwalniając różnicę energii wiązania w postaci energii kinetycznej produktów
- ❑ Najbardziej interesujące reakcje to:

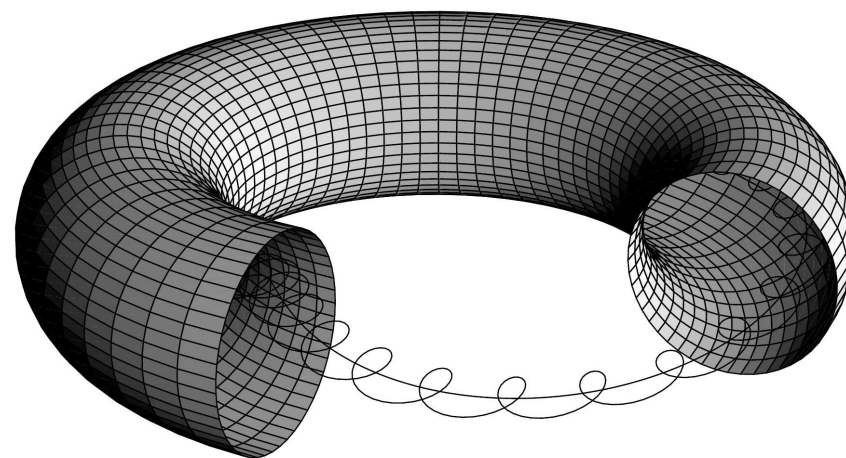
Reakcja	Q (MeV)	Q_c (MeV)	kT_e (keV)
$d + d \rightarrow {}^3\text{He} + n$	3.25	0.80	50
$d + d \rightarrow t + p$	4.03	4.00	50
$d + t \rightarrow {}^4\text{He} + n$	17.58	3.60	4
$d + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + p$	18.34	18.34	100
$p + {}^6\text{Li} \rightarrow {}^3\text{He} + {}^4\text{He}$	4.00	4.00	900
$p + {}^7\text{Li} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$	17.50	17.50	>900
$p + {}^{11}\text{B} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$	8.70	8.70	300

Uwięzienie gorącej plazmy, tokamaki

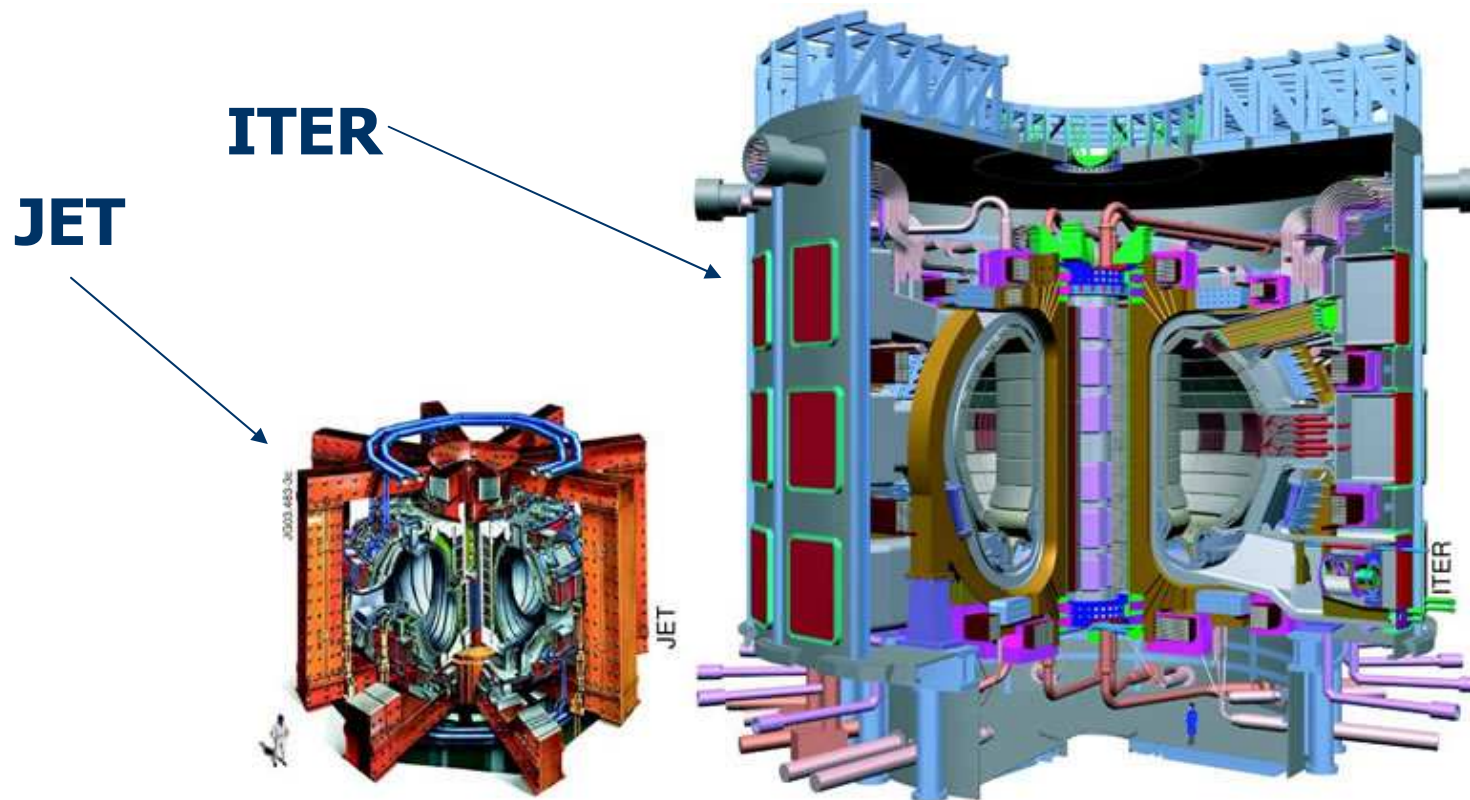
□ Sposoby:

- Grawitacyjne – dostępne tylko w gwiazdach
- Bezwładnościowe – gwałtowna kompresja zewnętrznej warstwy elementu paliwa wywołująca falę uderzeniową

- Magnetyczne – cząstki naładowane poruszają się po spiralach owijających się wokół linii pola magnetycznego



International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER)



Komu wierzyć?

- „Alternatywne” źródła energii – panaceum na energożerność naszej cywilizacji ?
- „Ekologiczne” surowce kopalne (gaz ziemny) ?
- A może „biopaliwa” ?
- Energia z rozszczepienia jąder ?
- Fuzja jądrowa?
- Energetyka jądrowa w Polsce ?

Literatura

