

# Składowanie i unieszkodliwianie odpadów promieniotwórczych

dr inż. Patryk Wojtowicz

Uniwersytet Warszawski  
Zakład Fizyki Jądrowej  
[Patryk.Wojtowicz@fuw.edu.pl](mailto:Patryk.Wojtowicz@fuw.edu.pl)

# Plan seminarium

- Rodzaje odpadów jądrowych
- Składowanie odpadów jądrowych
- Przerób wypalonego paliwa jądrowego
- Metody zestalania odpadów jądrowych
- Transmutacja jądrowa
- Zestalanie pierwiastków w szklach krzemionkowych metodą zol-żel

# Rodzaje odpadów jądrowych

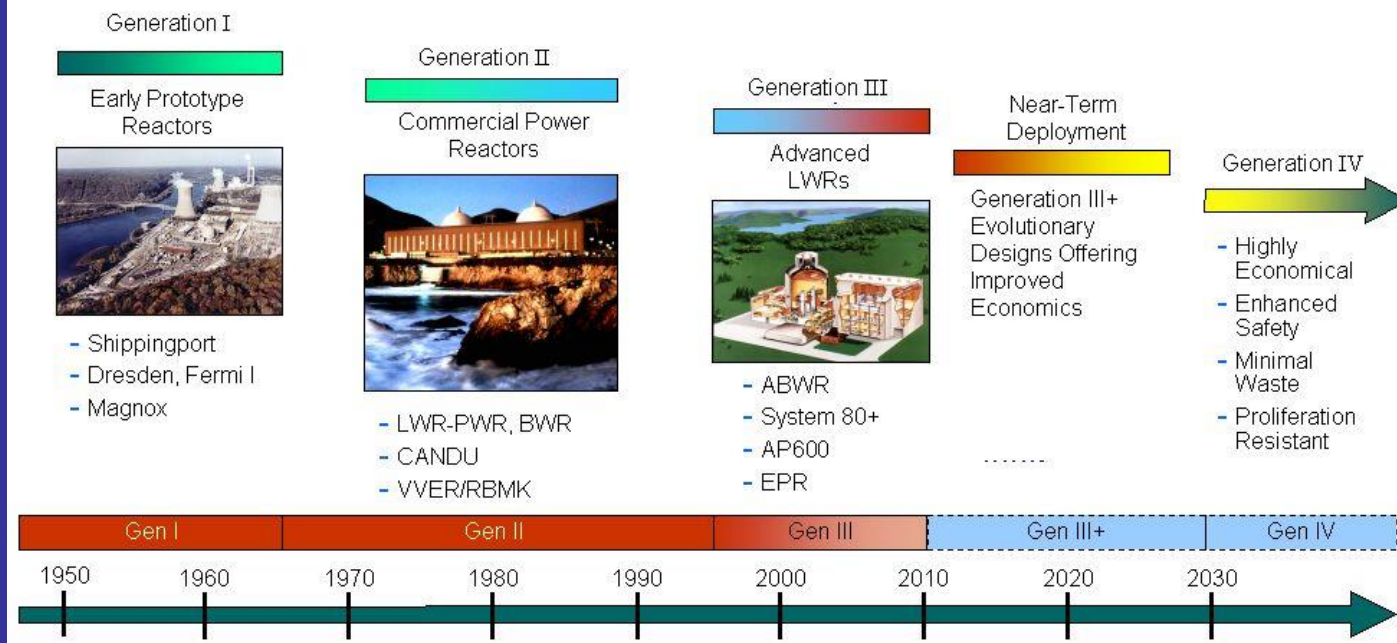
Odpady niskoaktywne  $< 370 \text{ MBq/m}^3$

Odpady średnioaktywne  $370 \text{ MBq/m}^3$  –  
 $37 \text{ TBq/m}^3$

Odpady wysokoaktywne  $> 37 \text{ TBq/m}^3$

# Ilość odpadów jądrowych – Reaktor jądrowy II generacji

**Generation IV:** Nuclear Energy Systems Deployable no later than 2030 and offering significant advances in sustainability, safety and reliability, and economics



155 m<sup>3</sup> na rok niskoaktywnych odpadów

22 m<sup>3</sup> na rok średnioaktywnych odpadów

20 m<sup>3</sup> (27 ton) na rok wypalonego paliwa jądrowego

# Wypalone uranowe paliwo jądrowe

Aktywność właściwa  $3,7 \times 10^{14}$  Bq/g

Strumień cieplny  $20\ 000$  W/m<sup>3</sup>

## Skład

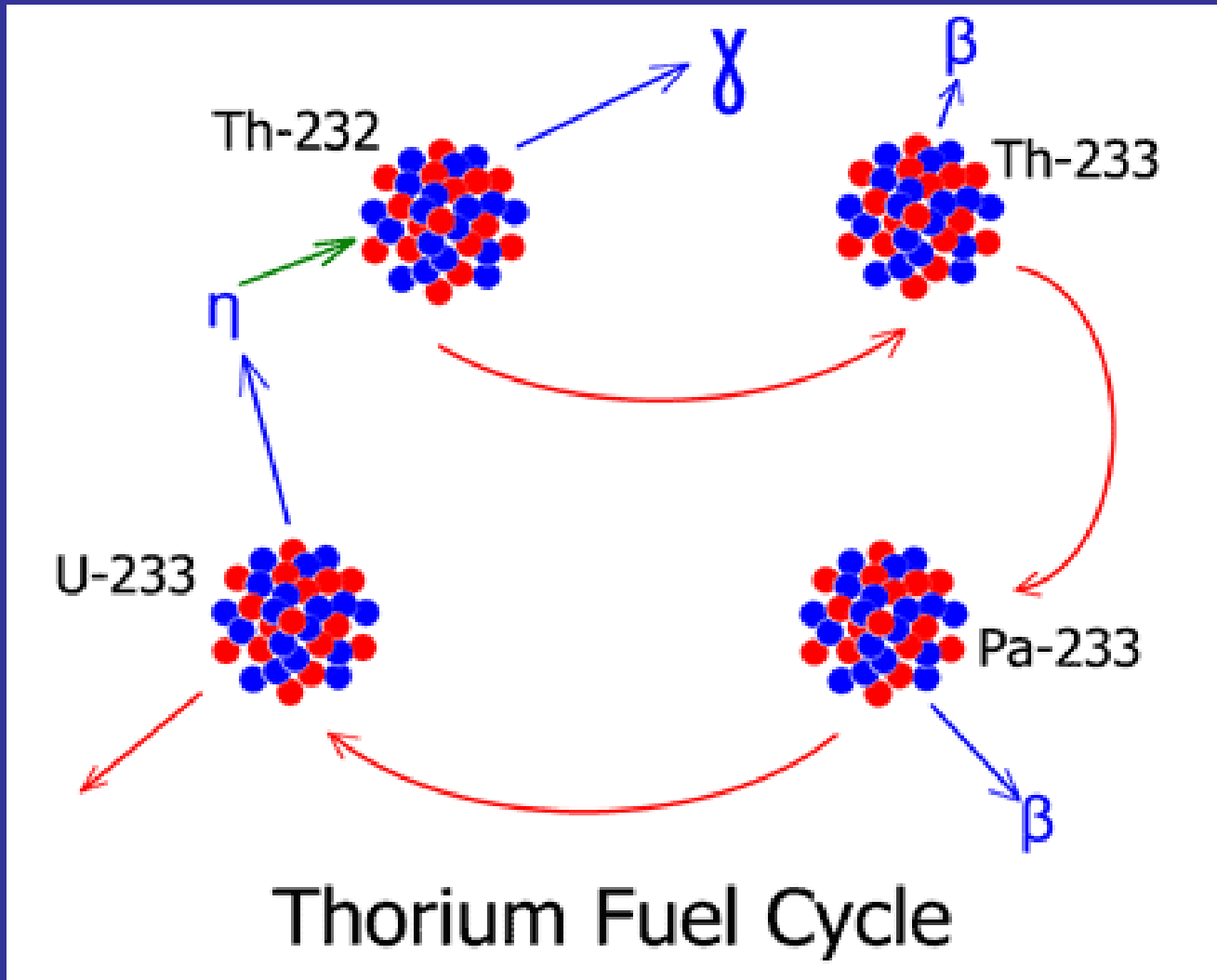
Uran 94 – 96 %

Pluton 1 %

Produkty rozszczepienia (<sup>137</sup>Cs, <sup>90</sup>Sr, <sup>90</sup>Zr) 3,9 %

Aktynowce mniejszościowe (<sup>241</sup>Am, <sup>244</sup>Cm, <sup>237</sup>Np) 0,1 %

# Torowy cykl paliwowy



# Dwutlenek toru



Stephen Francis Ashley., Colin Boxall., Geoffrey Thomas Parks.: Nuclear energy: Thorium fuel has risks, Nature, December (2012)

Tor nie wymaga procesu wzbogacenia

Mniejsza ilość pierwiastków długożyciowych w porównaniu z cyklem uranowym (plutonu, ameryku, kiuru, neptunu)

# Składowanie wypalonego paliwa jądrowego

## Składowanie mokre przy reaktorze

Wypalone paliwo składowane w basenach przy reaktorze

Kontrola parametrów i składu chemicznego wody

Kontrola zawartości produktów i czynników korozyjnych

## Składowanie suche

Kontrola parametrów powietrza chłodzącego zbiornik



# Przechowalnik mokry CLAB – Oskarshamn w Szwecji



# Projekt składowiska - Góry Yucca w stanie Nevada - USA



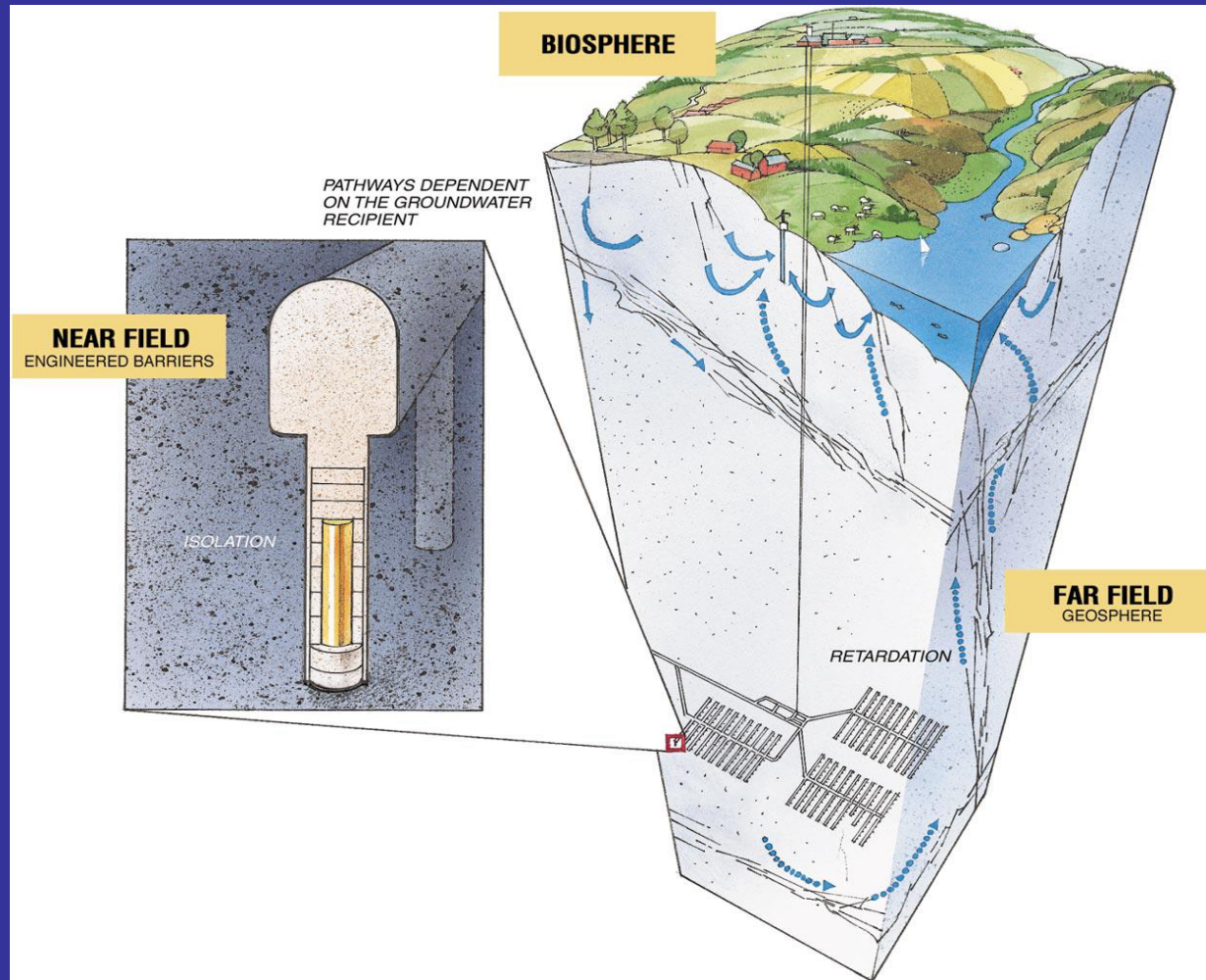
Kubowski J.: Nowoczesne elektrownie jądrowe, WNT, Warszawa (2010)

Suchy klimat

Czas bezpiecznego składowania 10 000 lat

Pojemność składowiska 70 000 t odpadów jądrowych

# Projekt składowiska – Szwecja i Finlandia



Pojemność  
składowiska - 500 t  
paliwa wypalonego

Ericsson L.O.: Geoscientific R&D for high level radioactive waste disposal in Sweden— current status and future plans, *Engineering Geology* 52, 305–317 (1999)

# Problem odpadów jądrowych we Francji

- Dwa składowiska powierzchniowe: La Manche oraz L'Aube
- La Manche – pojemność 535 000 m<sup>3</sup>
- L'Aube – pojemność 1 mln m<sup>3</sup>, 60 – 80 lat eksploatacji
- Odpady wysokoaktywne – Ośrodek Badawczy w Marcoule

# Składowanie odpadów jądrowych – struktury geologiczne

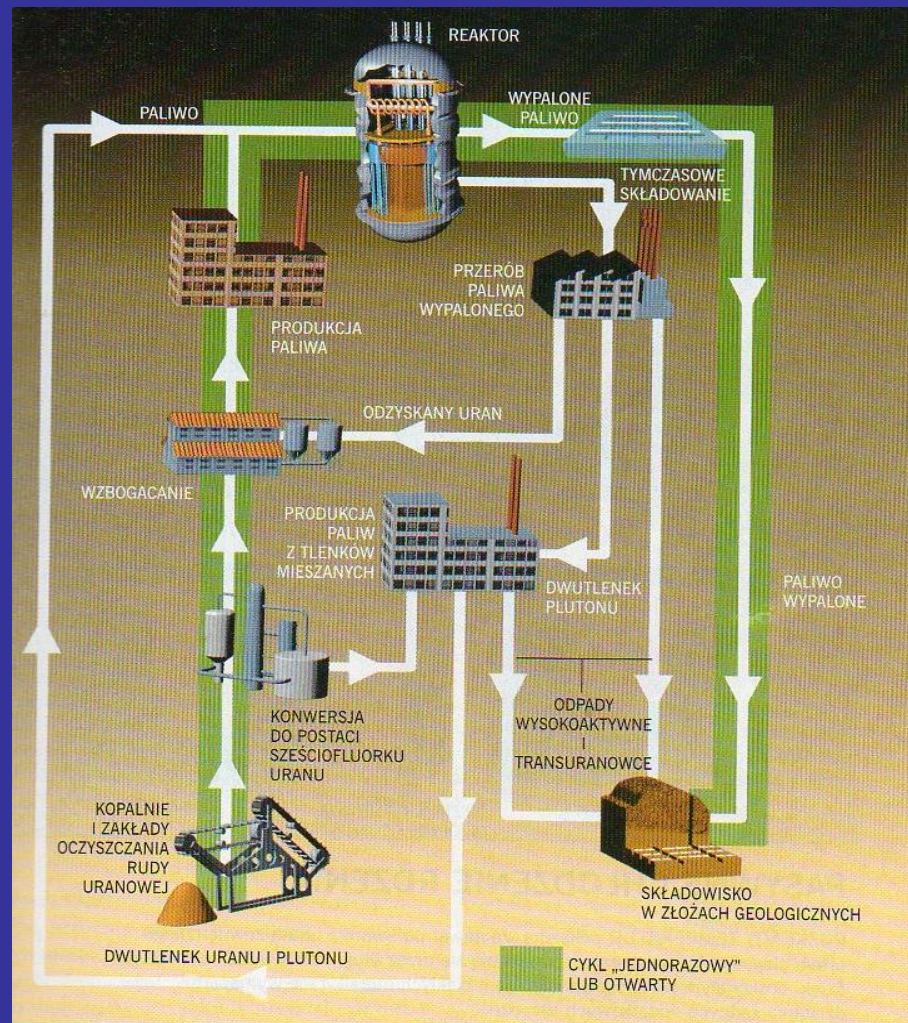
Niemcy - pokłady solne

Belgia - pokłady gliny

USA i Rosja - tufy wulkaniczne

Szwecja i Finlandia - skały granitowe

# Otwarty i zamknięty cykl paliwowy



Lake A.J., Bennett G.R., Kotek F.J.: Energetyka jądrowa nowej generacji, Świat Nauki (2002)

# Proces Purex - (Plutonium and Uranium Recovery by Extraction)

- Rozpuszczenie prętów paliwowych w kwasie azotowym
- Zastosowanie roztworu trójbutylofosforanu (TBP) w celu ekstrakcji plutonu i uranu z fazy wodnej
- Faza organiczna zawiera uran i pluton, a faza wodna zawiera produkty rozszczepienia
- Najpierw ekstrahowany jest pluton, potem uran wskutek przepłukiwania fazy organicznej rozcieńczonym kwasem azotowym
- Uzyskuje się rozdzielone roztwory azotanowe  $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$  oraz  $\text{Pu}(\text{NO}_3)_4$ , które następnie przerabia się do dwutlenku uranu  $\text{UO}_2$  i dwutlenku plutonu  $\text{PuO}_2$

# Paliwo MOX – (Mixed Oxides)

- Paliwo MOX stanowi mieszanina dwutlenku uranu  $\text{UO}_2$  i dwutlenku plutonu  $\text{PuO}_2$
- Składa się z plutonu w ilości 7 % oraz uranu w ilości 93 %
- Stosowane w elektrowniach jądrowych we Francji, Japonii, Niemczech, Belgii oraz Szwajcarii
- Produkowane na skalę przemysłową we Francji (Cadarache, Marcoule), w Wielkiej Brytanii (Sellafield) oraz w Belgii (Dessel)



# Cementowanie

- Niskie koszty i łatwy dostęp do różnego rodzaju cementów
- Stosowany dla odpadów ciekłych i stałych
- Cement nie jest materiałem palnym
- Cement to materiał o niskiej odporności na korozję

# Bituminizacja

Wysoka zdolność do przyjmowanie odpadów

Stosowany również dla odpadów ciekłych

Niskie koszty

Palność

Niska odporność  
na promieniowanie

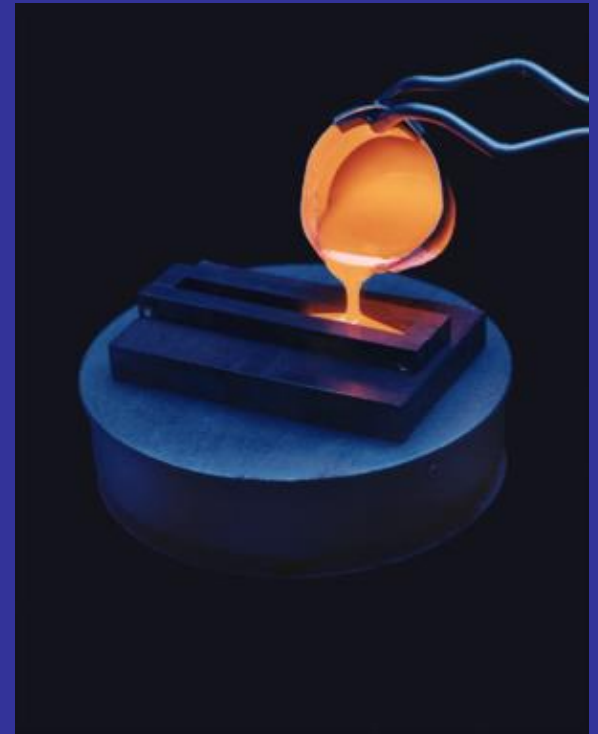


# Technologia Synroc

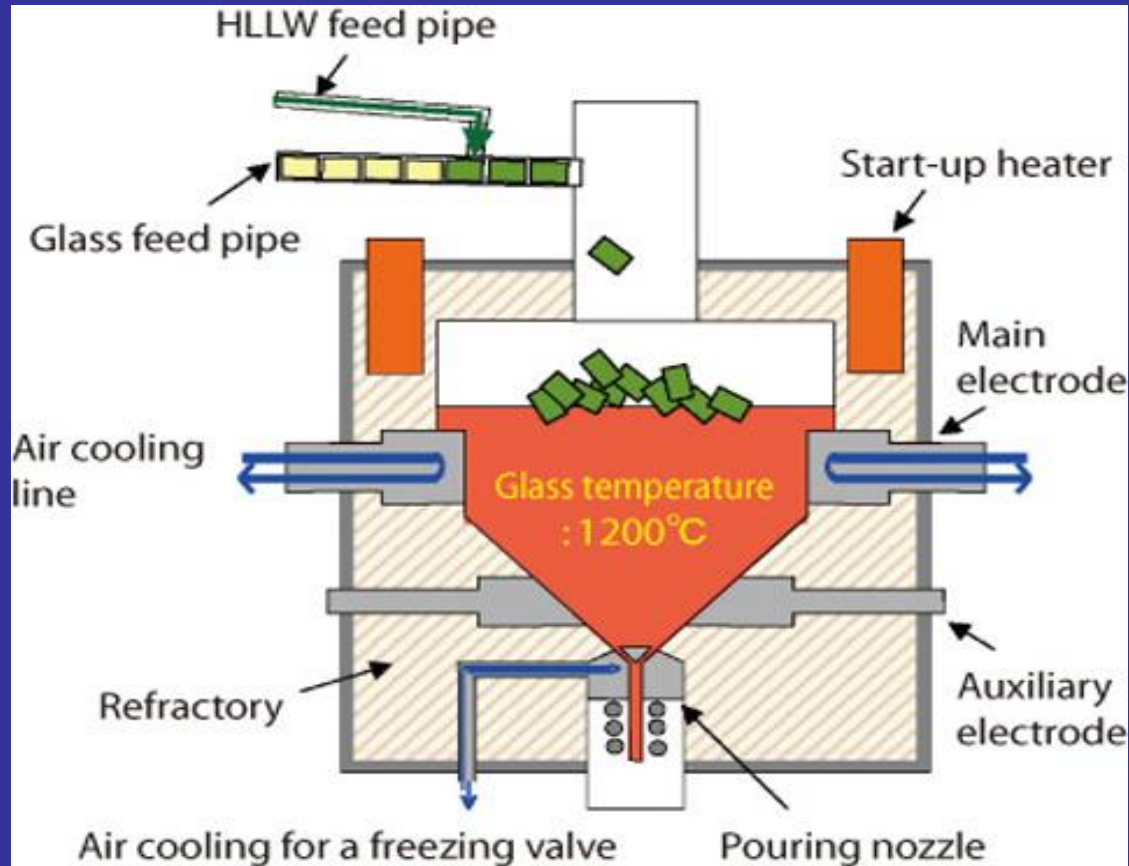
- Synroc-C zawiera holandyt ( $\text{BaAl}_2\text{Ti}_6\text{O}_{16}$ ), cyrkonolit ( $\text{CaZrTi}_2\text{O}_7$ ) oraz perowskit ( $\text{CaTiO}_3$ )
- Synroc-D zawiera nefelin  $(\text{Na, K})\text{AlSiO}_4$
- Synroc-F zawiera pirochlor ( $\text{Ca}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ )
- Materiał ten może wiązać pierwiastki przez miliony lat takie jak na przykład uran i tor w swojej strukturze krystalicznej

# Witryfikacja

- amorficzna struktura szkła
- odporność chemiczna
- odporność na wmywanie
- duża twardość
- odporność na działanie promieniowania
- odpady jądrowe mogą być składowane do miliona lat

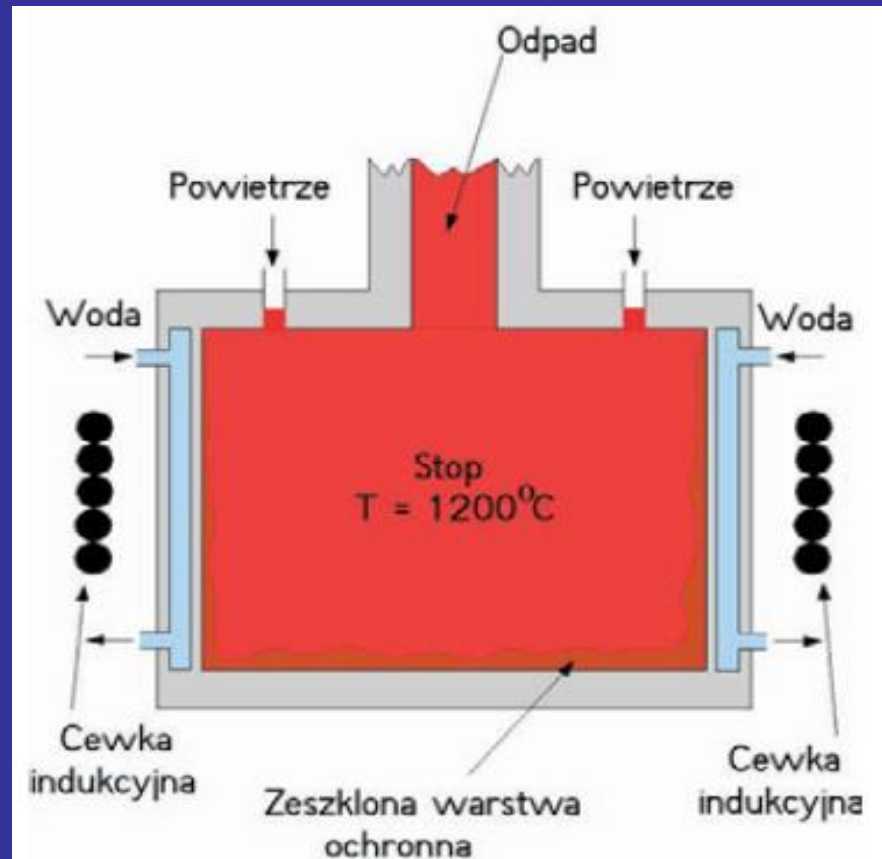


# Witryfikacja – piec elektryczny



Colombo P., Brusatin G., Bernardo E., Scarinci G.: Inertization and reuse of waste materials by vitrification and fabrication of glass-based products, *Current Opinion in Solid State and Materials Science* 7, 225–239 (2003)

# Witryfikacja – zimny tygiel

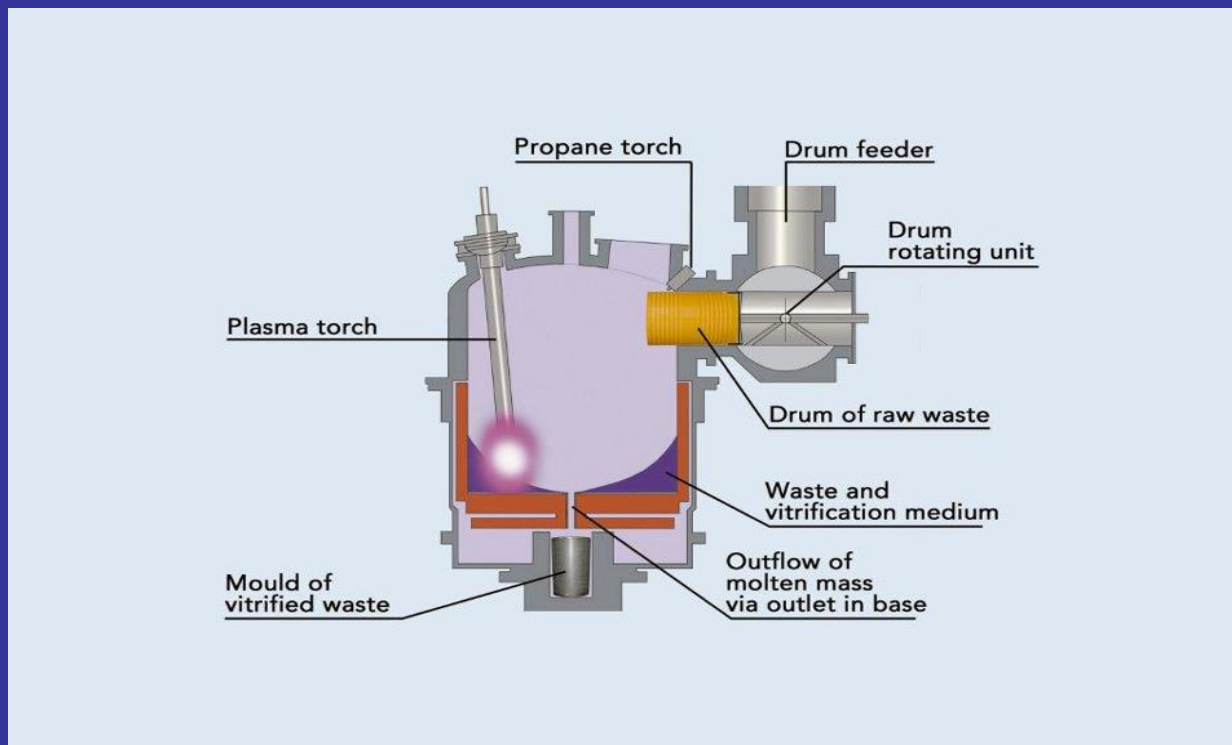


Kim C.W., Ray C.S., Zhu D., Day D.E., Gombert D., Aloy A., Mogu A., Milankovi, Karabulut M.: Chemically durable iron phosphate glasses for vitrifying sodium bearing waste (SBW) using conventional and cold crucible induction melting (CCIM) techniques, Journal of Nuclear Materials 322, 152–164 (2003)

# Witryfikacja – plazmotron

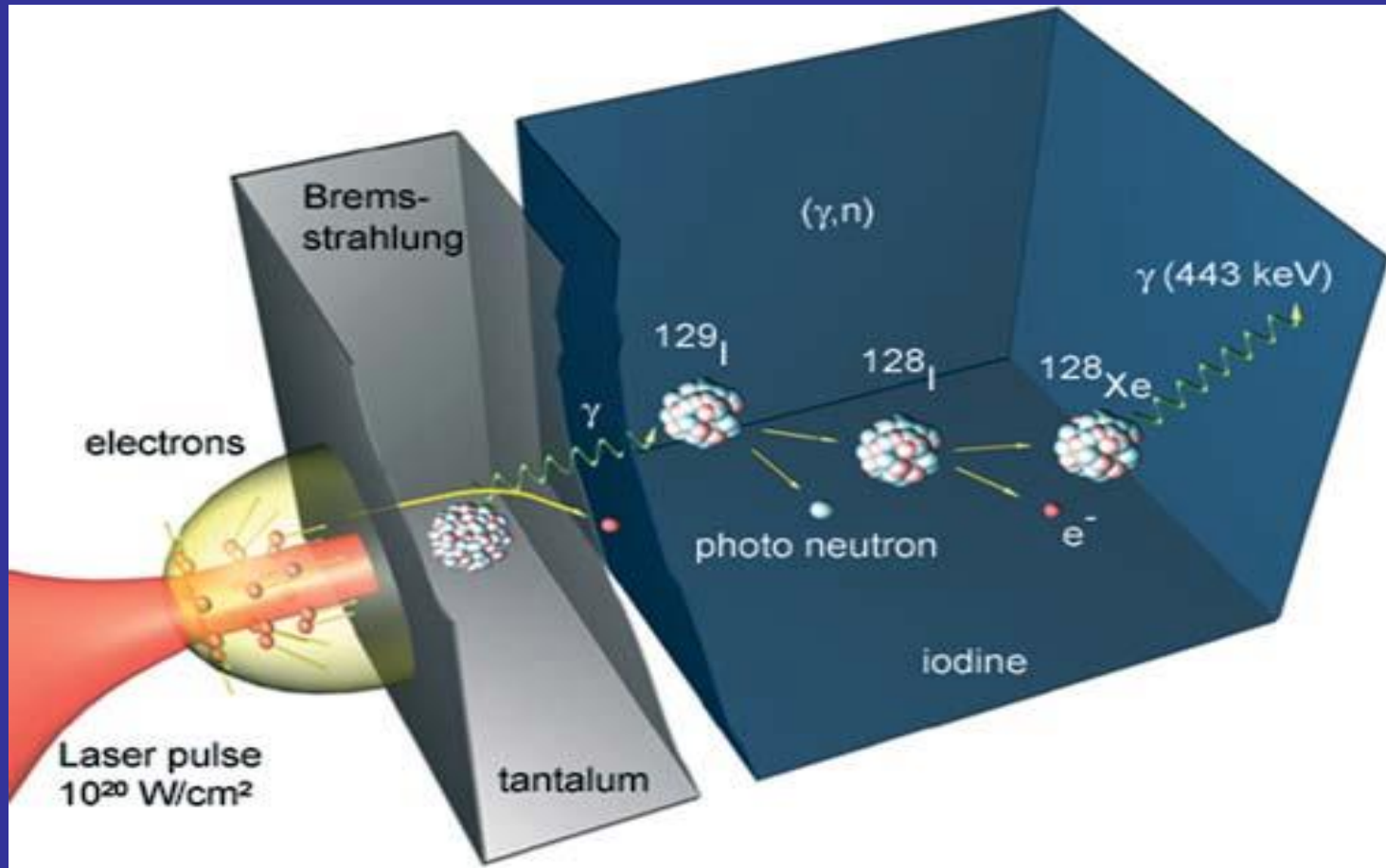
Francja (plazmotron, moc 600 – 800 kW)

Japonia (plazmotron, moc 160 kW)



Yao Y., Hossain M.M., Watanabe T., Matsuura T., Funabiki F., Yano T.: A multi-phase AC arc discharge and its application in in-flight thermal treatment of raw glass powders, *Chemical Engineering Journal* 139, 390–397 (2008)

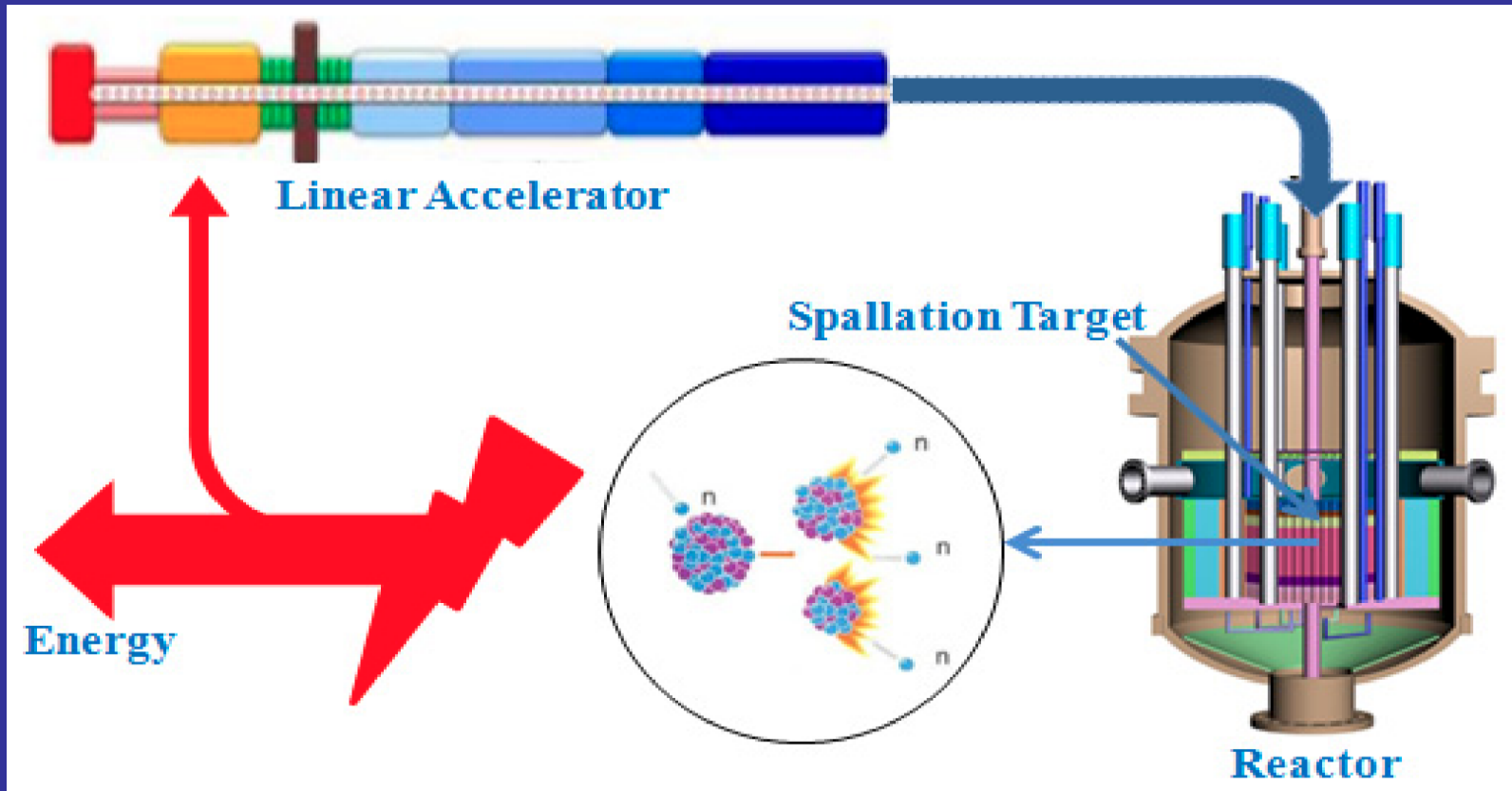
# Transmutacja laserowa



Magill J., Schwoerer H., Ewald F., Galy J., Schenkel R., Sauerbrey R.:  
Laser transmutation of iodine-129, Appl. Phys. B (2003)



# Reaktor hybrydowy



Xuesong Yan., Lei Yang., Xunchao Zhang., and Wenlong Zhan.:  
Concept of an Accelerator-Driven Advanced Nuclear Energy System  
(2017)

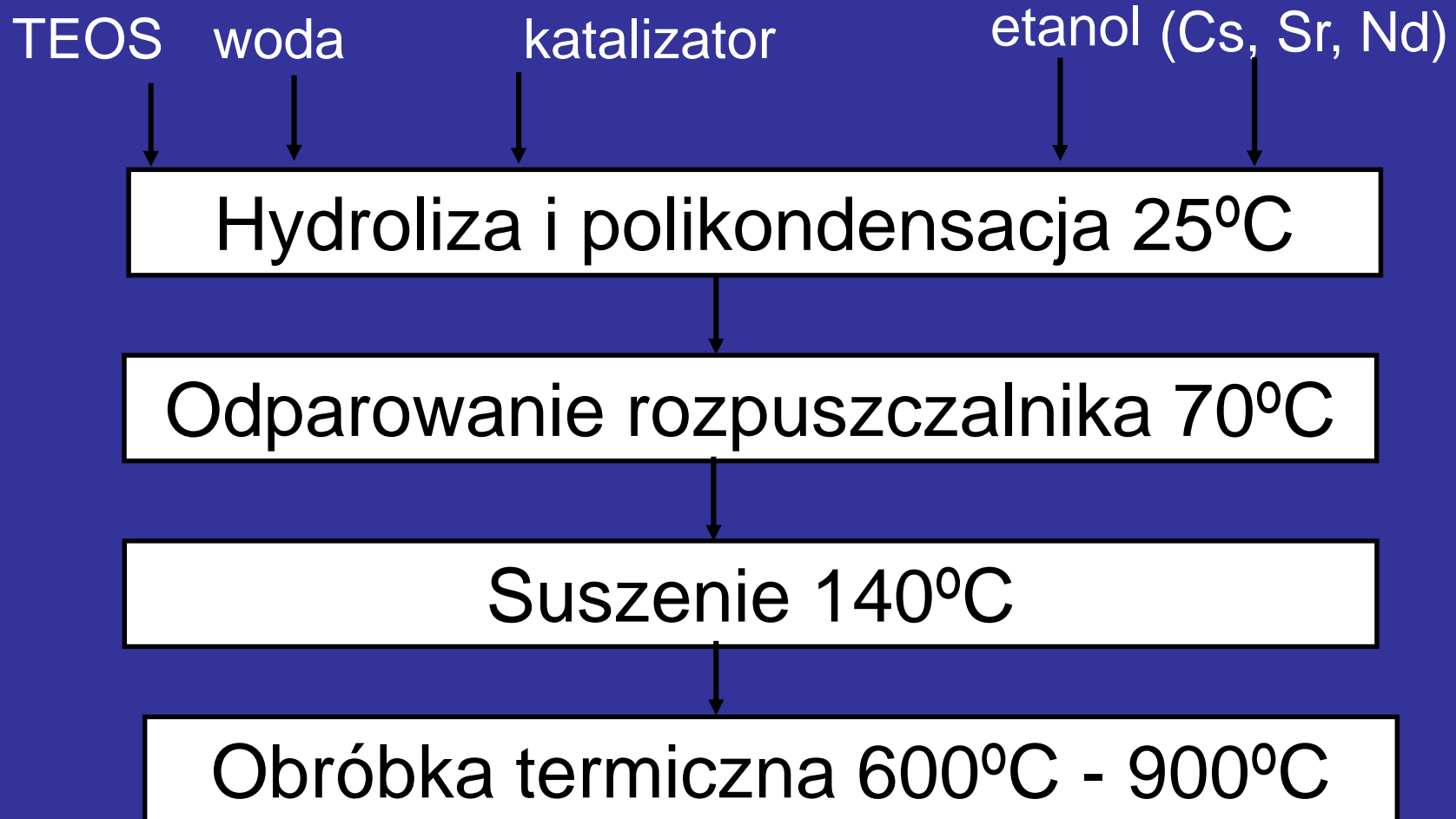
# Reaktor hybrydowy - Projekty

- Projekt Phoenix – Brookhaven National Laboratory (BNL)
- Projekt – Accelerator-Driven Transmutation Technology (ADTT) (LANL)
- Projekt Omega - Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI)

# Metoda zol – żel

- Zestalenie w szklach krzemionkowych przebiega w niższych temperaturach
- Nie jest wymagana skomplikowana aparatura do przeprowadzenia procesu
- Możliwość uzyskania materiału w formie ziaren sferycznych, włókien, warstw, proszków oraz monolitów

# Synteza szkielek krzemionkowych – Metoda zol – żel

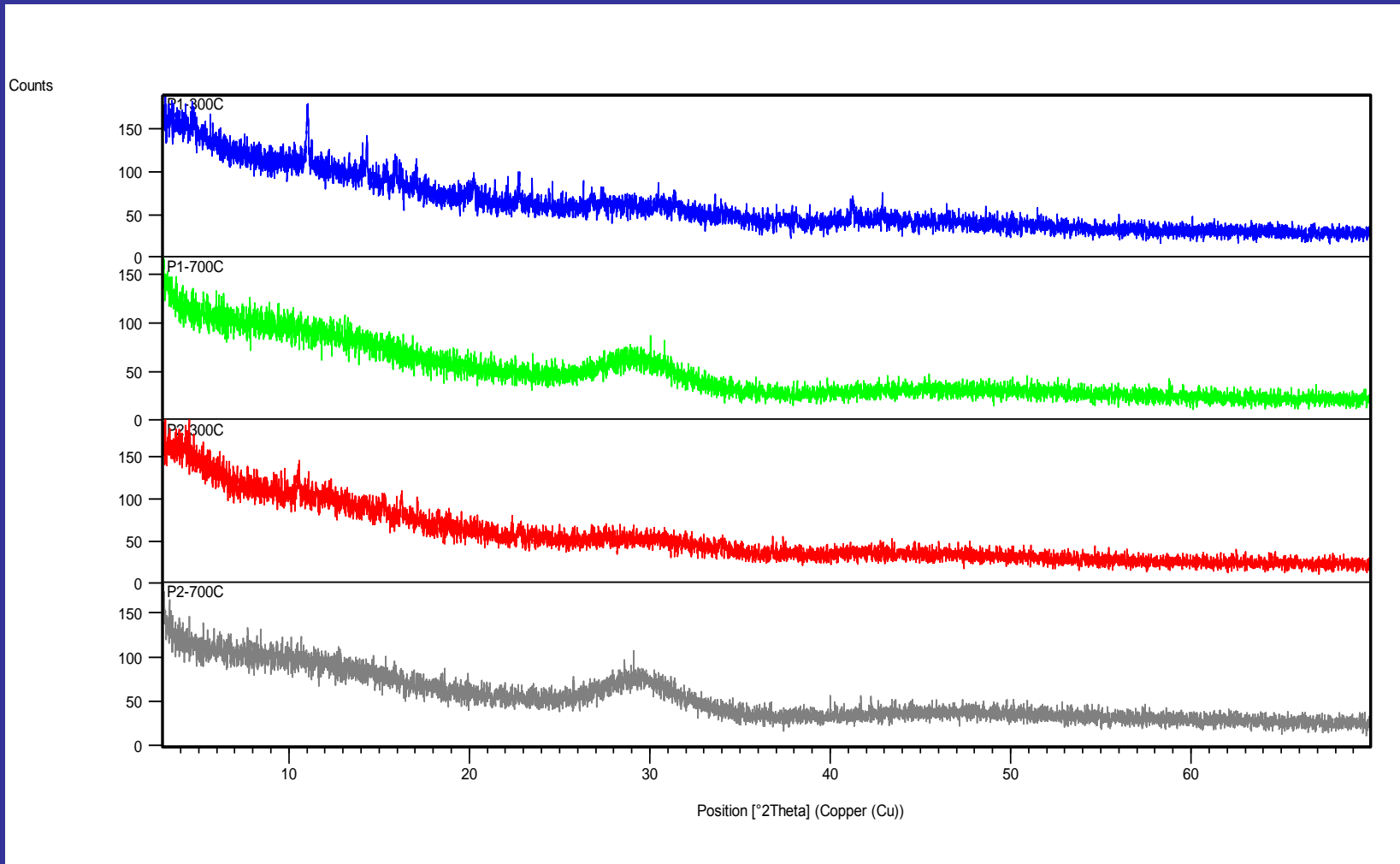


# Metoda zol – żel - Aparatura

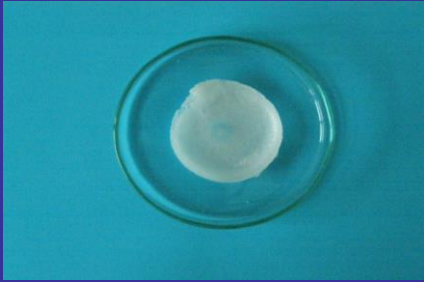


Nie jest wymagana skomplikowana aparatura do przeprowadzenia procesu

# Wyniki – metoda XRD



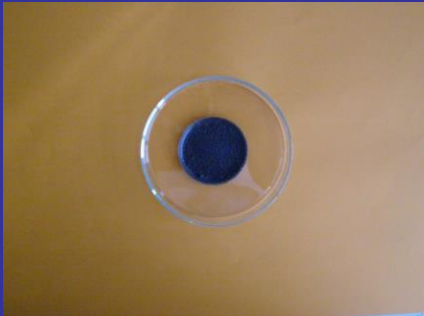
Wyniki badań metodą XRD potwierdziły amorficzną strukturę próbek po obróbce termicznej w temperaturze 700°C



Temperatura obróbki termicznej - 600°C  
Skład – szkło krzemionkowe dotowane cezem  
Kwas solny jako katalizator



Temperatura obróbki termicznej - 600°C  
Skład – szkło krzemionkowe dotowane cezem  
Kwas askorbinowy jako katalizator



Temperatura obróbki termicznej - 900°C  
Skład – szkło krzemionkowe (Cs, Sr, Nd, Co)  
Kwas askorbinowy jako katalizator



Temperatura obróbki termicznej - 900°C  
Skład – szkło krzemionkowe (Cs, Sr, Nd, Co)  
Kwas solny jako katalizator

# Metoda zol – żel - Alternatywa

1. Proces zeszkliwiania pierwiastków zachodzi w niższych temperaturach
2. Synteza szkielek krzemionkowych metodą zol-żel nie wymaga drogiej i skomplikowanej aparatury
3. Surowce do produkcji szkielek krzemionkowych tą metodą są łatwo dostępne i tanie



# Podsumowanie

1. Odpady jądrowe stanowią problem dla rozwoju energetyki jądrowej
2. Największym wyzwaniem pozostaje unieszkodliwianie odpadów wysokoaktywnych – wypalonego paliwa jądrowego
3. Wypalone paliwo jądrowe jest składowane lub przerabiane i wykorzystywane ponownie
4. Cementowanie i bituminizacja – odpady nisko- i średnioaktywne
5. Zestalenie w szklach krzemionkowych i materiałach typu Synroc – odpady wysokoaktywne
6. Alternatywa – transmutacja
7. Metoda zol-żel