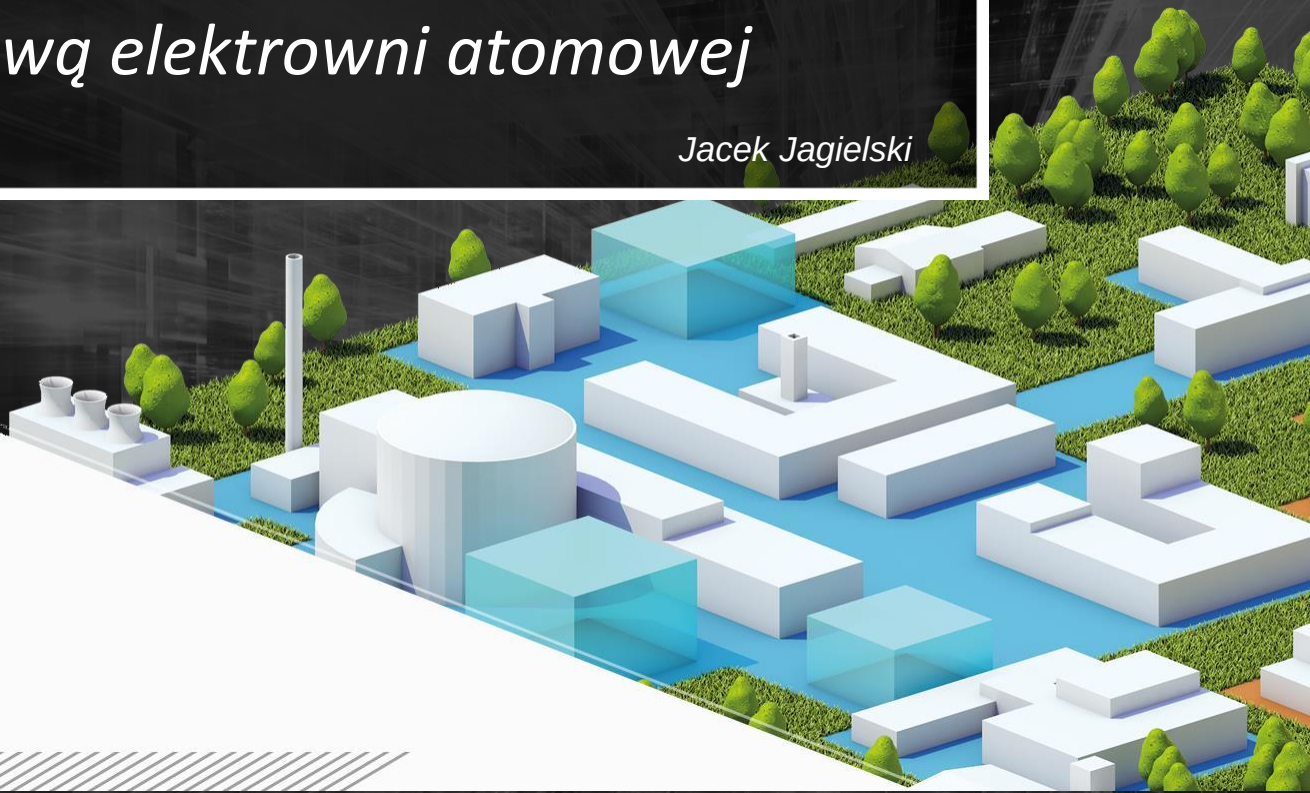
Badania materiałowe w technologiach jądrowych: wyzwania i szanse związane z budową elektrowni atomowej

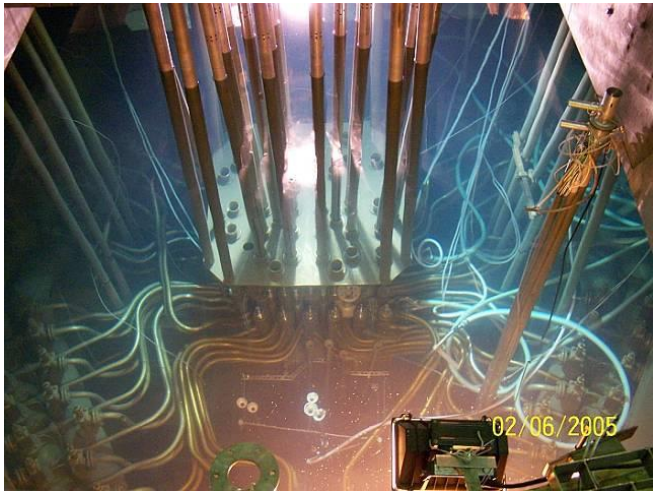
Jacek Jagielski



NARODOWE CENTRUM BADAŃ JĄDROWYCH
ŚWIERK

Outline

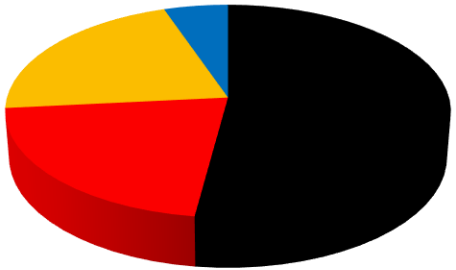
- Wstęp: dlaczego energia jądrowa
- Uwarunkowania formalne
- Specyfika badań materiałowych w technologiach jądrowych
- Defektowanie radiacyjne
- Obecne kierunki badań
- Miejsce dla polskiej nauki
- „Take away messages”



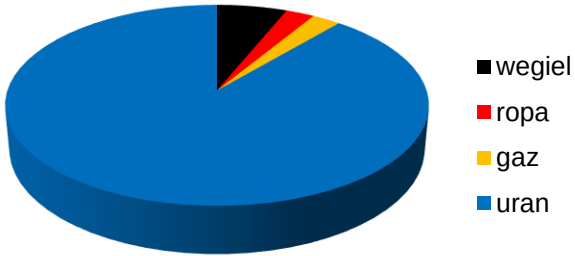
Dlaczego potrzebujemy energii jądrowej ?

Zasoby energetyczne Ziemi

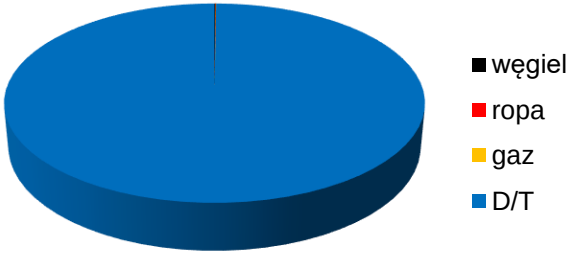
Dziś



Jutro: Gen 4



Pojutrze: fuzja



2000 **2050** **>2100**

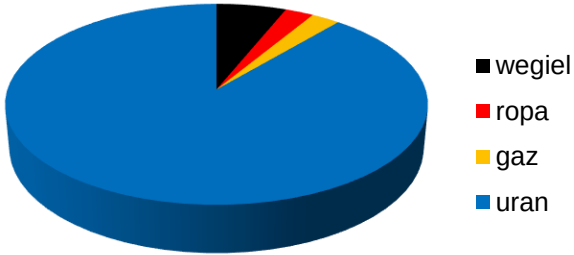
Dlaczego potrzebujemy energii jądrowej ?

Zasoby energetyczne Ziemi: *(proporcjonalnie do zasobów)*

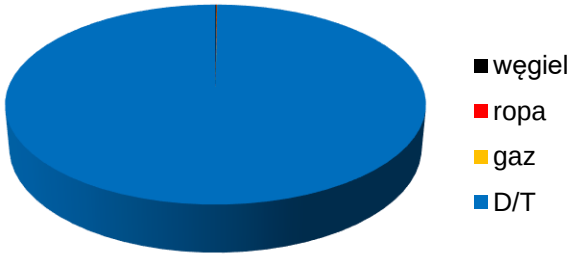
Dziś



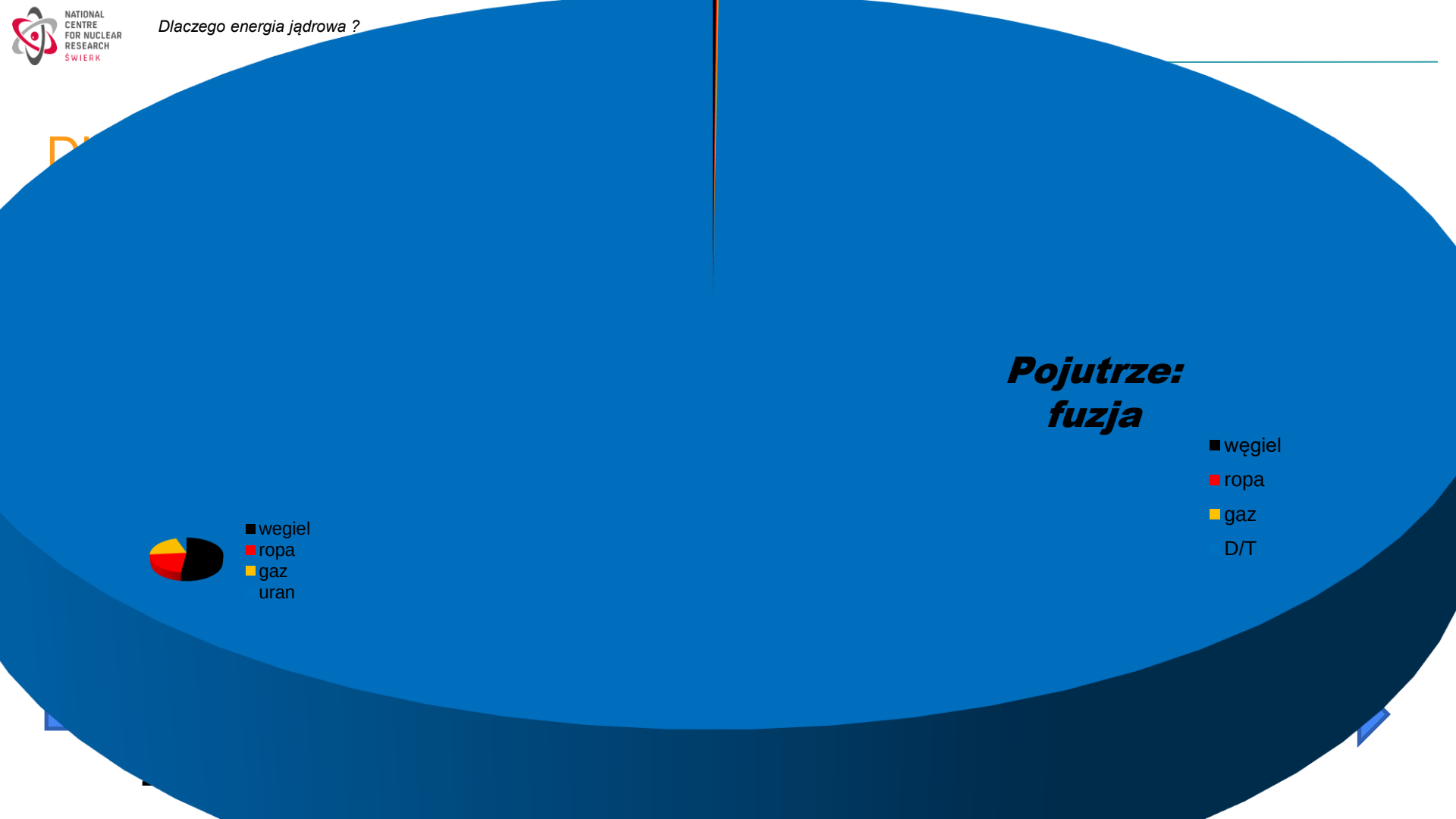
Jutro: Gen 4



Pojutrze: fuzja



2000 **2050** **>2100**

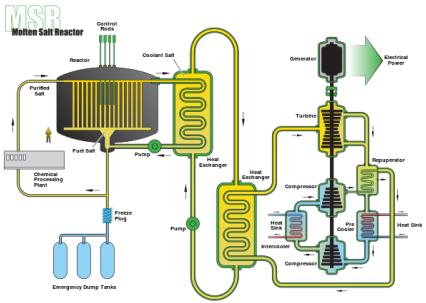

węgiel
ropa
gaz
uran
Pojutrze:
fuzja
węgiel
ropa
gaz
D/T

Dlaczego potrzebujemy energii jądrowej ?

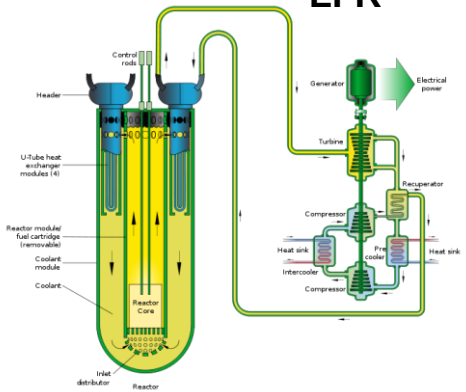
- W połowie XXI wieku energia jądrowa umożliwi dostęp do większości zasobów energetycznych Ziemi
- IV Generacja 10 krotnie zmniejszy aktywność odpadów radioaktywnych
- Produkcja energii z uranu uwolni malejące zasoby ropy, gazu i węgla dla przemysłu chemicznego
- Kogeneracja może rozwiązać problemy dostaw ciepła (np. dla przemysłu chemicznego) i produkcji wodoru, który może stać się alternatywnym paliwem dla transportu
- Energia jądrowa uniezależni nas od dostaw ropy i gazu, a niedługo i węgla

Jakie mamy opcje technologiczne ?

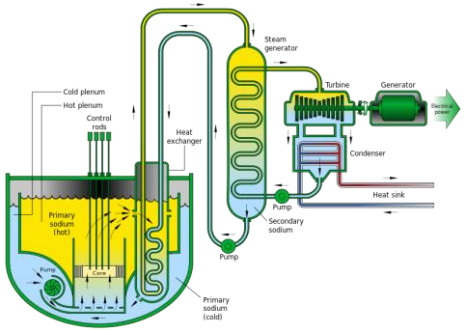
MSR



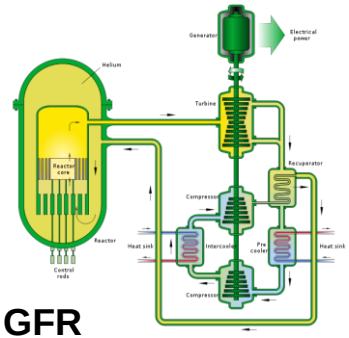
LFR



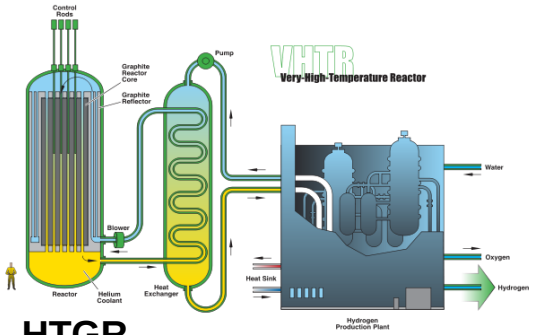
SFR



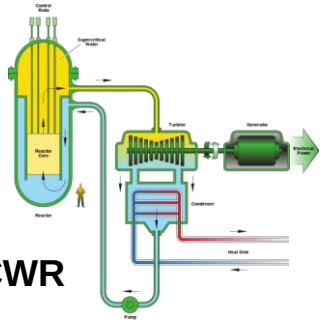
GFR



HTGR



SCWR

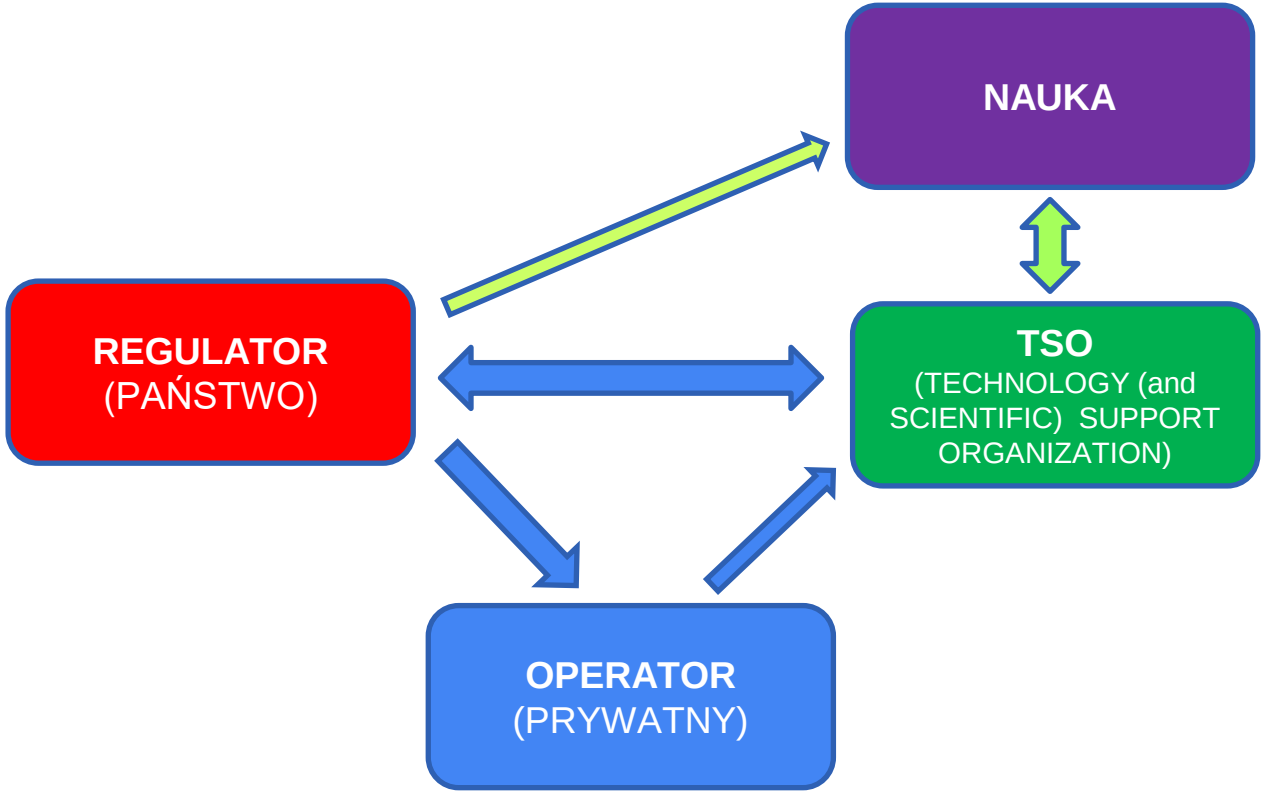


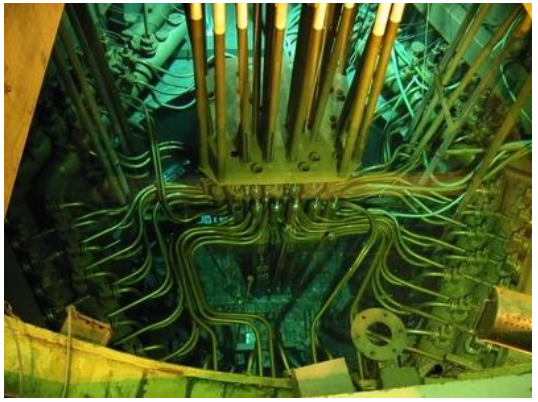
Dlaczego potrzebujemy energii jądrowej ?

- Przez 50 lat rozwoju energetyki jądrowej Francja zgromadziła zapas wypalonych prętów paliwowych z reaktorów II Generacji
- Ten materiał, niesłusznie nazywany „odpadami”, jest paliwem dla IV Generacji wystarczającym na 1000 lat obecnej produkcji prądu we Francji



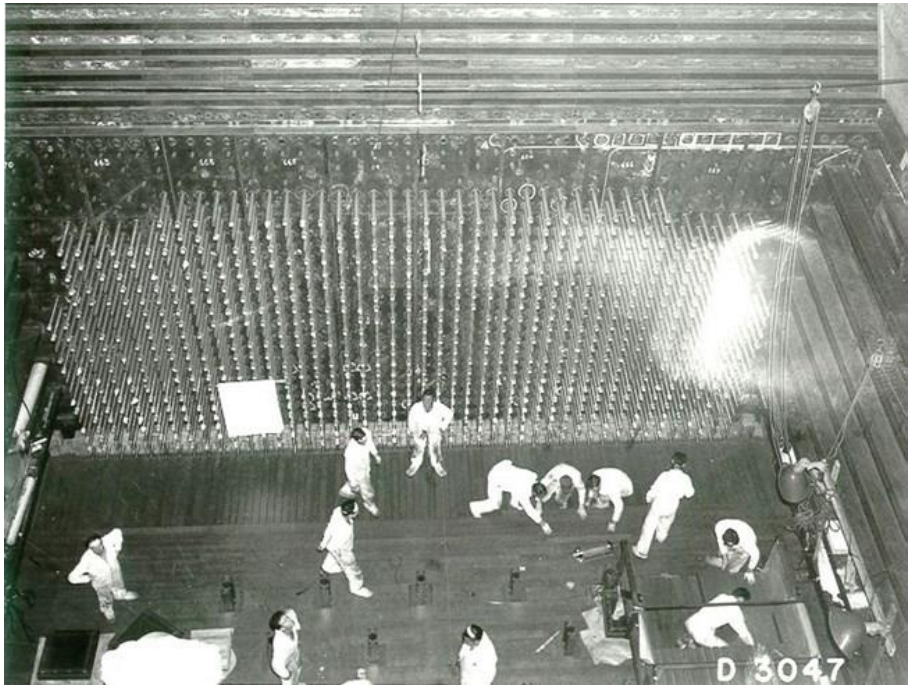
Uwarunkowania formalne

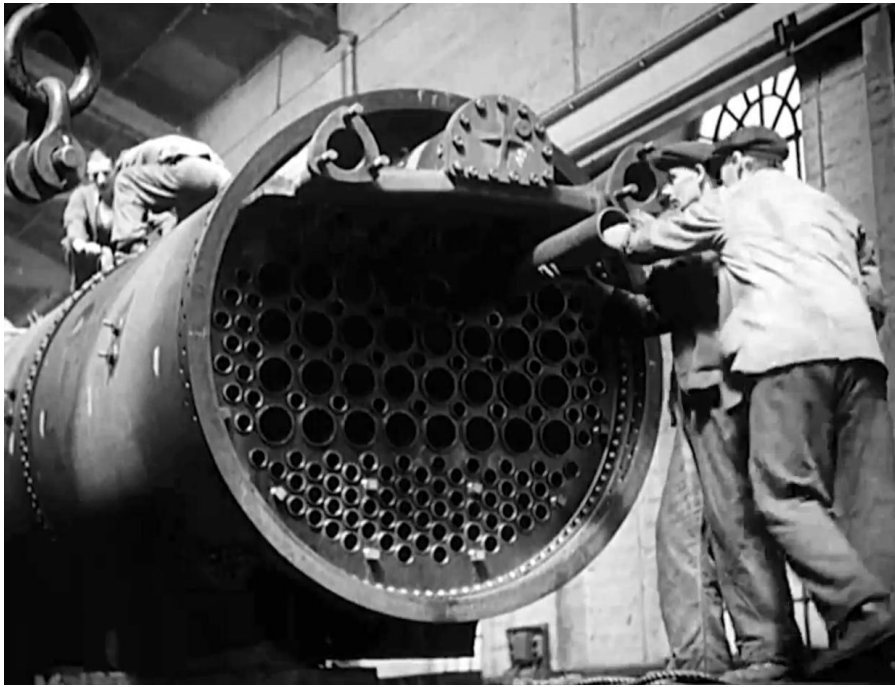






Specyfika badań materiałowych w technologiach jądrowych

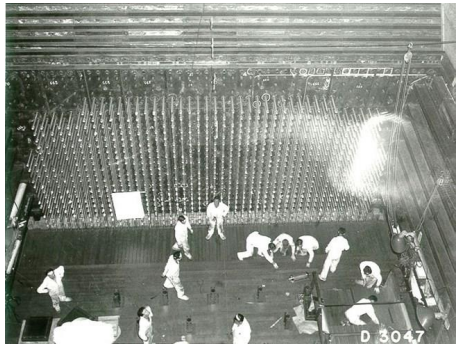




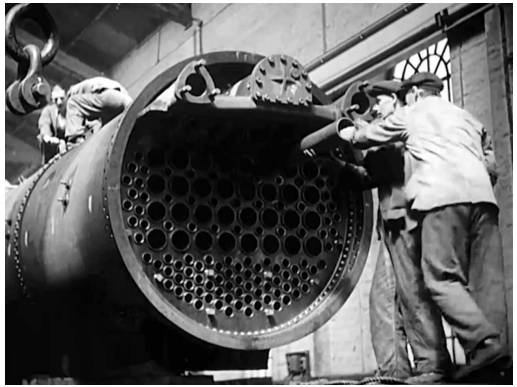
Specyfika badań materiałowych w technologiach jądrowych

Ale:

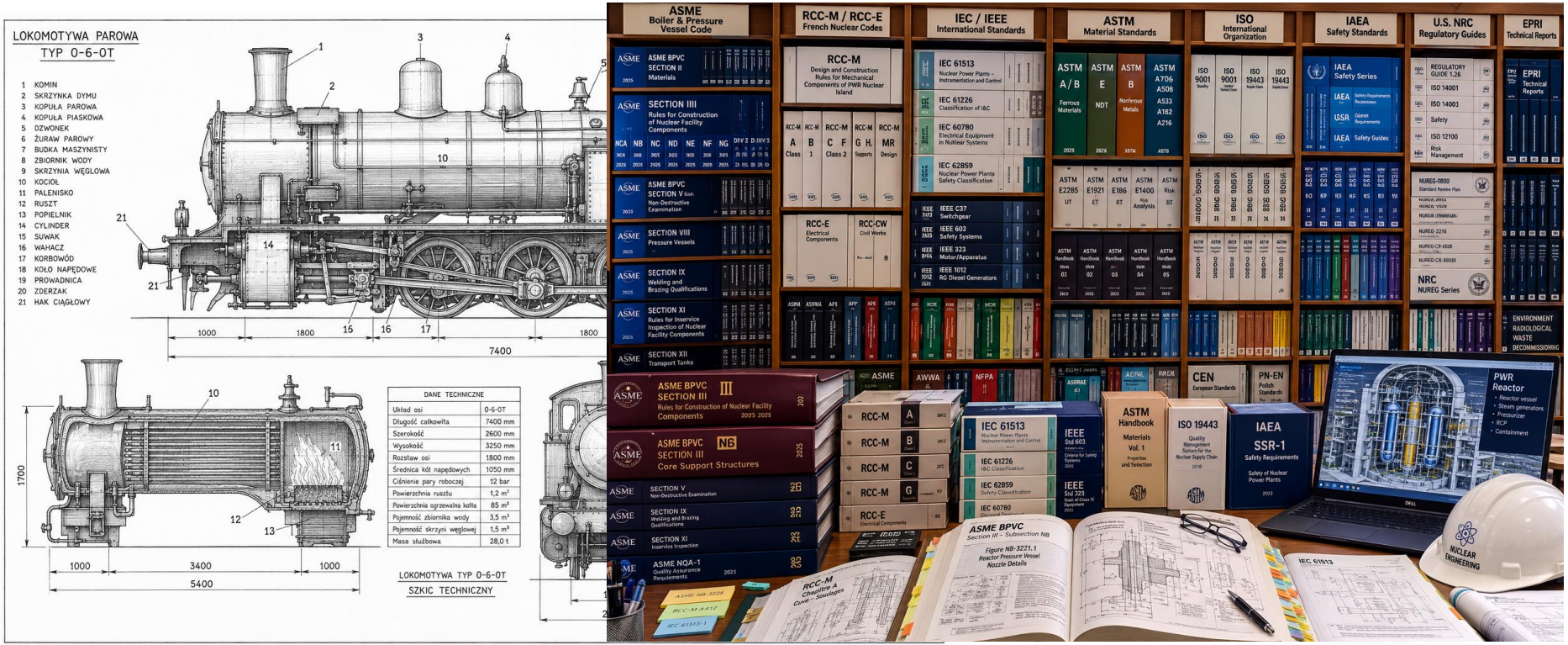
Reaktor ma działać **bezawaryjnie** przez sto lat
Ryzyko awarii:
Gen II 1/10,000 reaktorolat
Gen III i IV 1/100,000 reaktorolat
Koszty awarii: bardzo wysokie
Obawy społeczne: bardzo wysokie
Nieproliferacja



Lokomotywa działa kilkadziesiąt lat
Ryzyko awarii:
Nieistotne: jak ***się*** zepsuje to ***się*** naprawi
Koszty awarii: bardzo niskie
Obawy społeczne: nieistniejące
Nieproliferacja: nie ma tematu

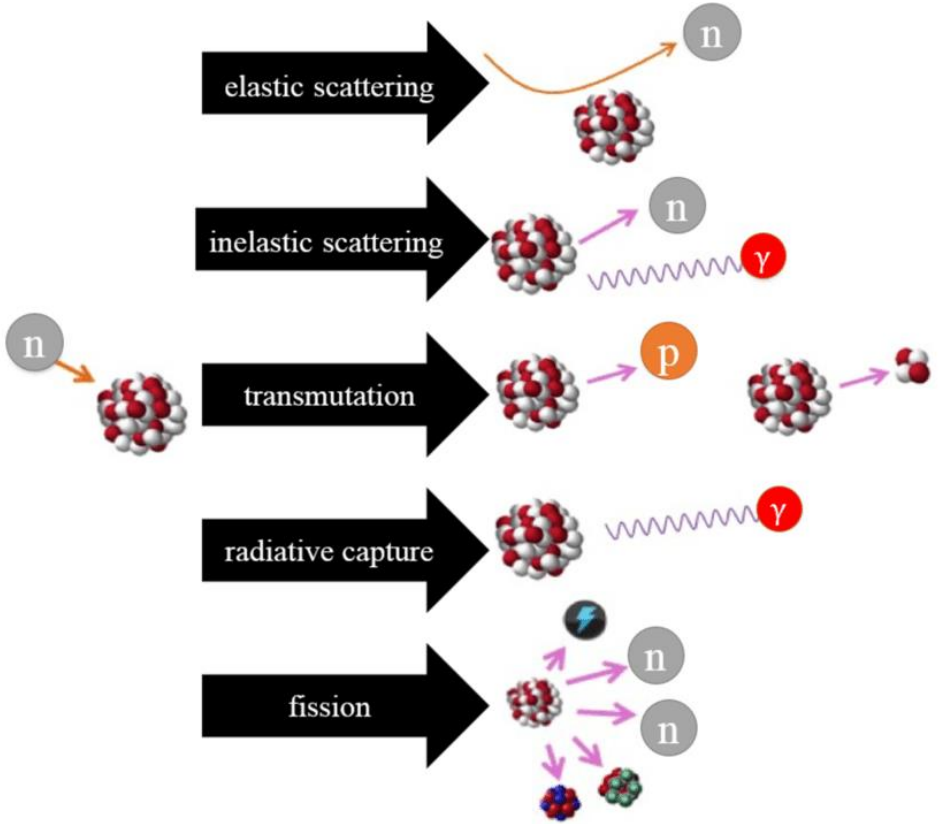


Specyfika badań materiałowych w technologiach jądrowych

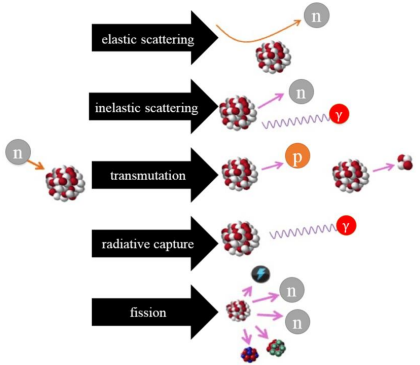


Defektowanie radiacyjne

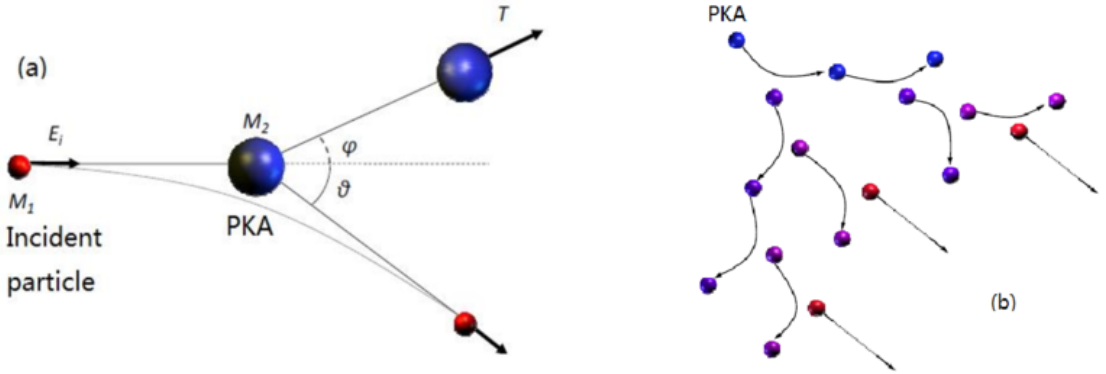
Reaktor jądrowy PWR/BWR
(neutrony termiczne)



Defektowanie radiacyjne

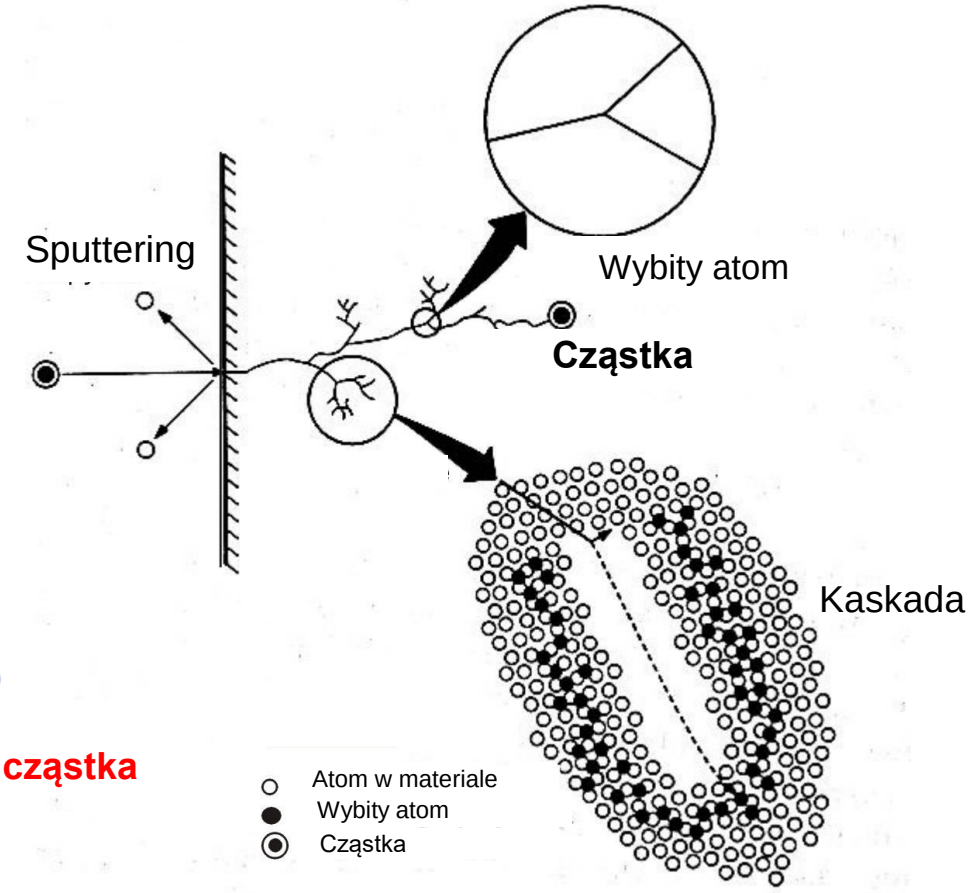


Reaktor jądrowy Gen IV
(neutrony szybkie)



Bezpośrednie wybicie atomów przez neutrony

Kaskady wybiciowe

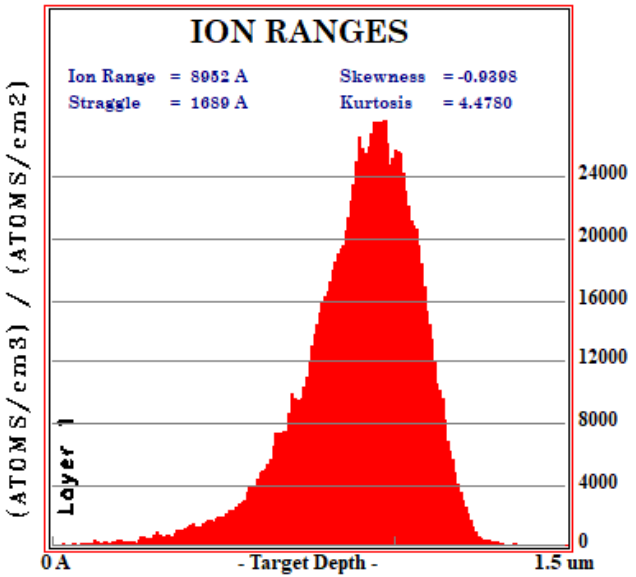


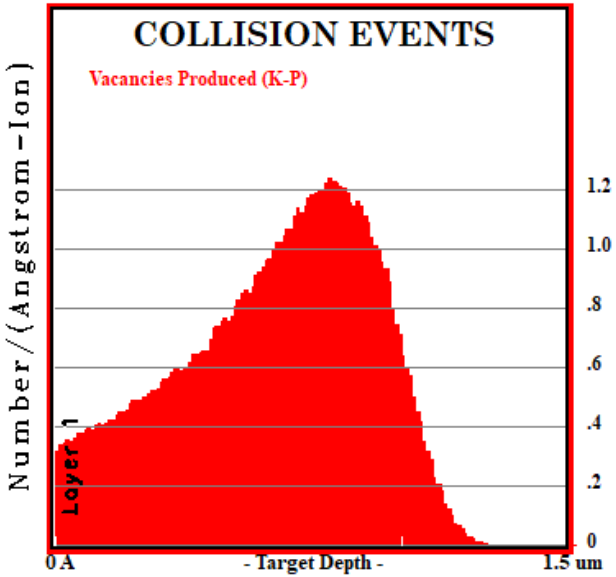
Sekwencja zdarzeń:

Cząstka zderza się z kilkoma atomami (tzw. PKA)
PKA zderza się z kolejnymi atomami
Większość defektów tworzą wybite atomy, nie cząstka

Wybite atomy

Podstawowym parametrem opisującym stopień defektowania jest d.p.a.





Przykład:

3 MeV Cr do warstwy Cr na rurce paliwowej z Zr4

Symulacja SRIM

Wybite atomy

Podstawowym parametrem opisującym stopień defektowania jest d.p.a.

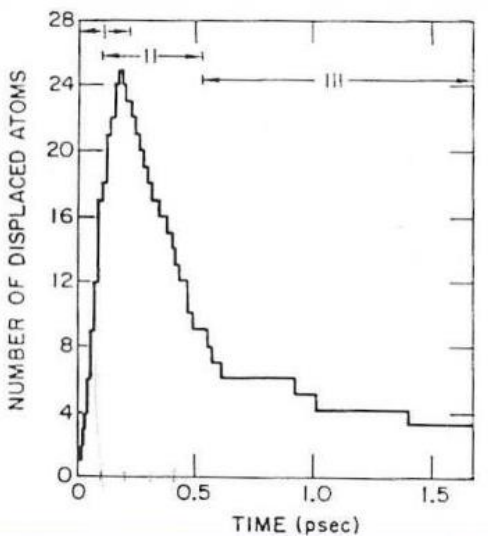
Zalety:

Uniwersalny parametr pozwalający na użycie go jako **skali jakiegokolwiek procesu defektowania** (zarówno neutronami jak i jonami)

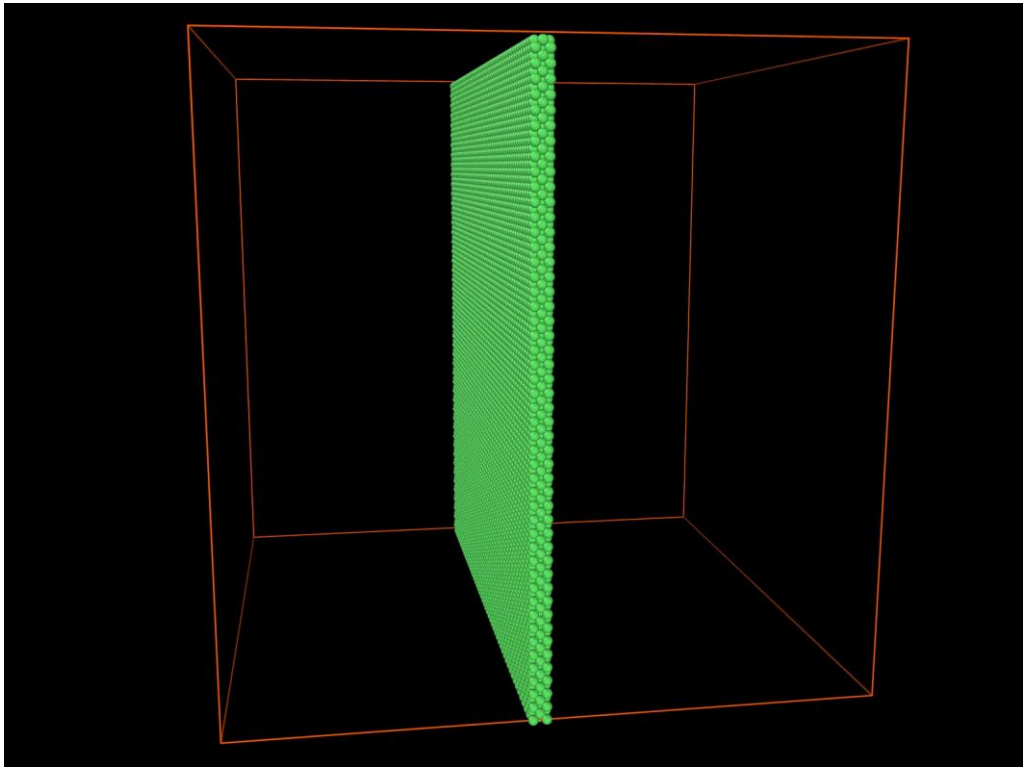
Wady:

Podaje **maksymalną** liczbę wybitych atomów, nie liczbę defektów **pozostającą** w materiale.

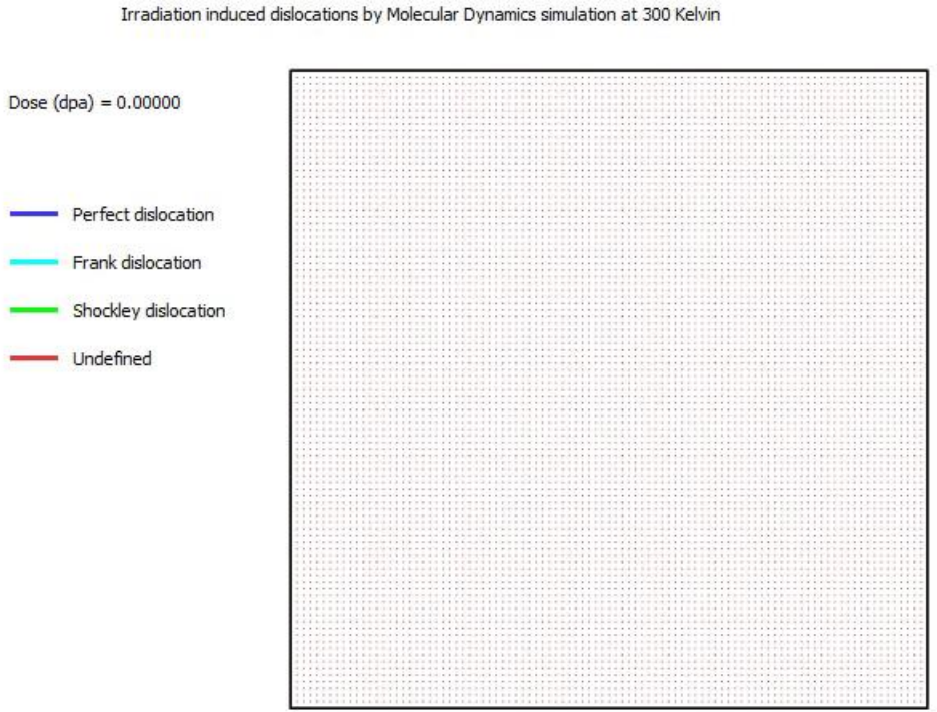
Nie uwzględnia **akumulacji ani transformacji** defektów



Ewolucja zdefektowania



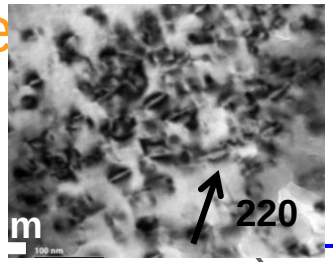
Ewolucja zdefektowania



$$f_d = \sum_{i=1}^{m} \left(f_{d,i}^{sat} - f_{d,i-1}^{sat} \right) G \left[1 - \exp(-\sigma_i (\Phi - \Phi_{i-1})) \right]$$

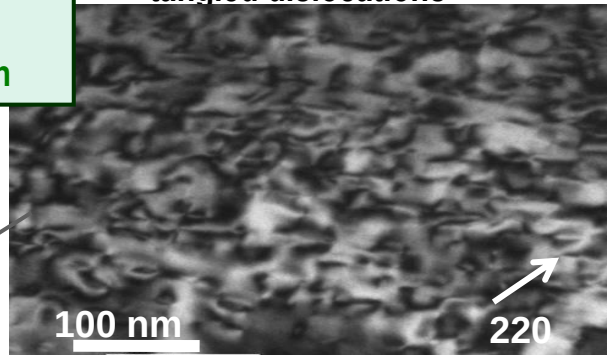
Multi-Step Damage Accumulation model (MSDA)

Dislocation loops a zde

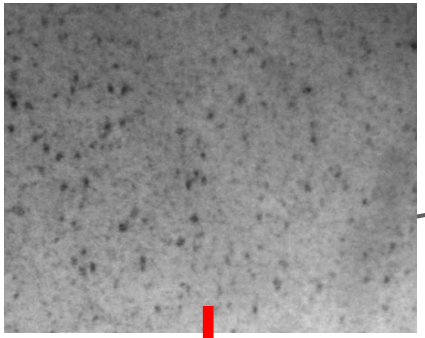


Relaxation of the elastic strain

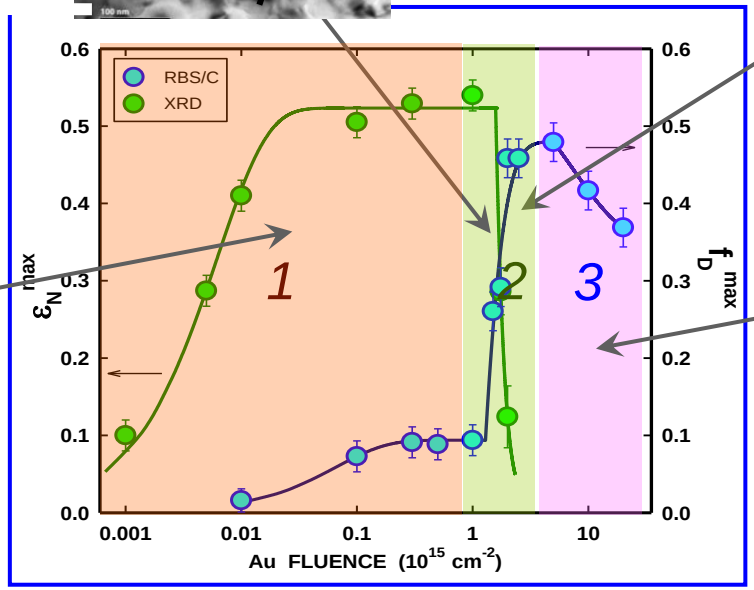
Network of tangled dislocations



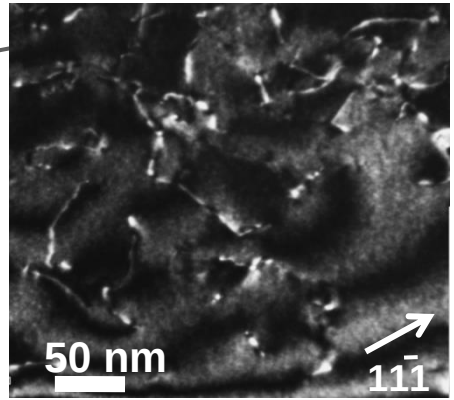
Small defect clusters



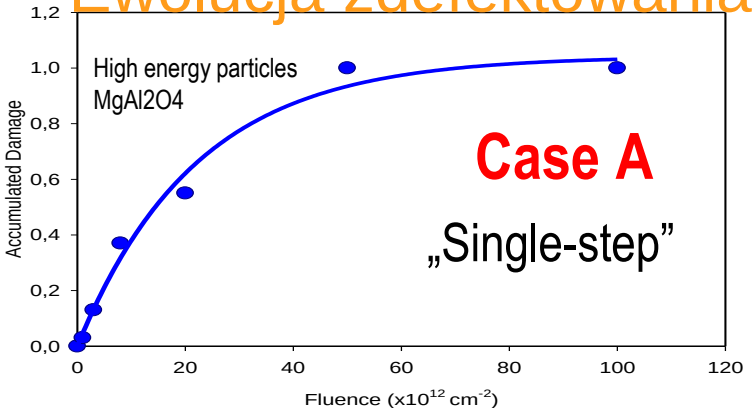
Increase of the elastic strain

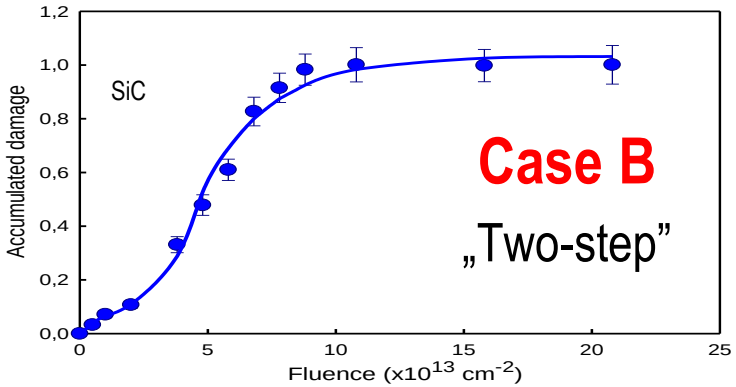


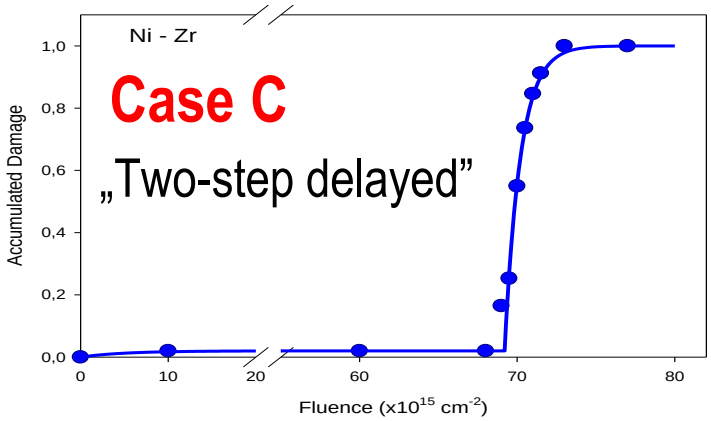
Long dislocations

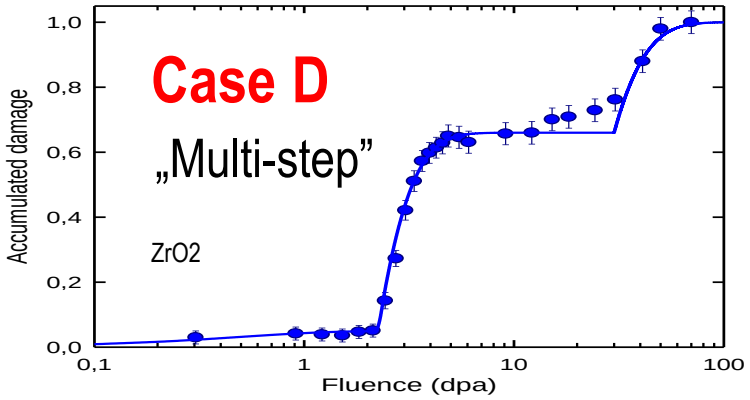


Ewolucja zdefektowania









Akumulacja defektów radiacyjnych

„Take away messages”:

1. Większość defektów tworzą **wybite atomy** materiału, nie **padające cząstki**:
a) W konsekwencji możliwe jest w pewnym stopniu zastąpienie neutronów szybkimi jonami do badania wczesnych faz akumulacji defektów.

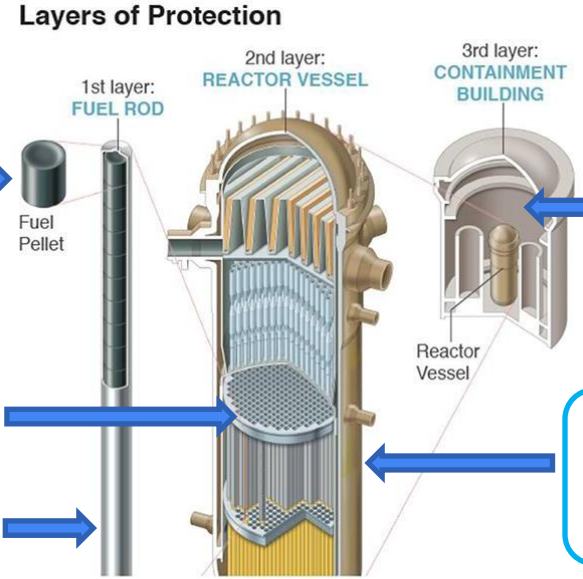
2. Akumulacja defektów **nie jest procesem liniowym**: dwa razy większa dawka nie oznacza dwa razy wyższego poziomu zdefektowania.

3. Podczas defektowania zmianie ulega **struktura materiału** i **defektów radiacyjnych**, co istotnie zmienia właściwości funkcjonalne.

Materiały i defektowanie w reaktorze

Ceramiki
Szybkie neutrony, Produkty rozszczepienia, Alfy
Silne defektowanie

Metale (Zr4, stale)
Szybkie i termiczne neutrony, Alfy
Silne/średnie defektowanie



Metale (stale), beton, polimery
Gammy
Niskie defektowanie

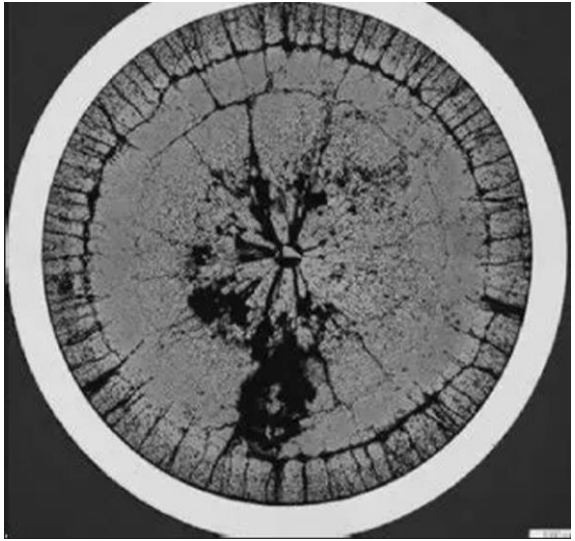
Metale (stale)
Neutrony termiczne
Niskie/średnie defektowanie

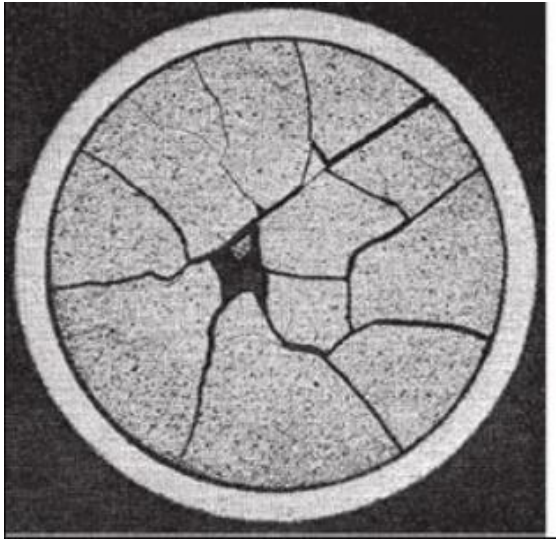
The reactor vessel's main role is to contain the nuclear chain reaction and the pressure caused by heating the water in the reactor core.

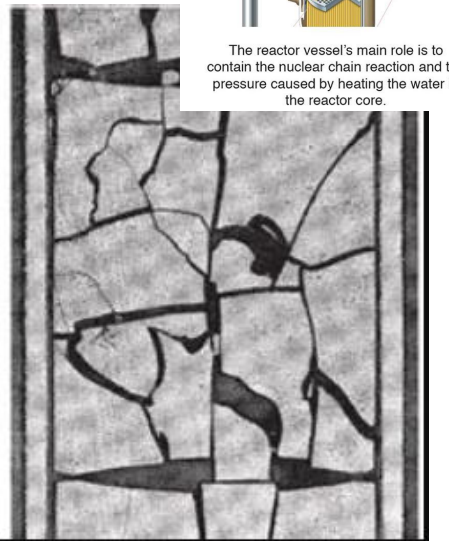


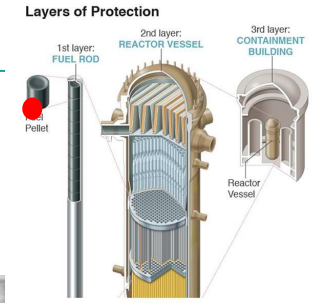
www.linkedin.com/posts/emirates-nuclear-energy-corporation_the-reactor-vessel-is-one-of-the-many-defense-in-depth-activity-7874470482815770625-wbGm

Materiały i defektowanie w reaktorze





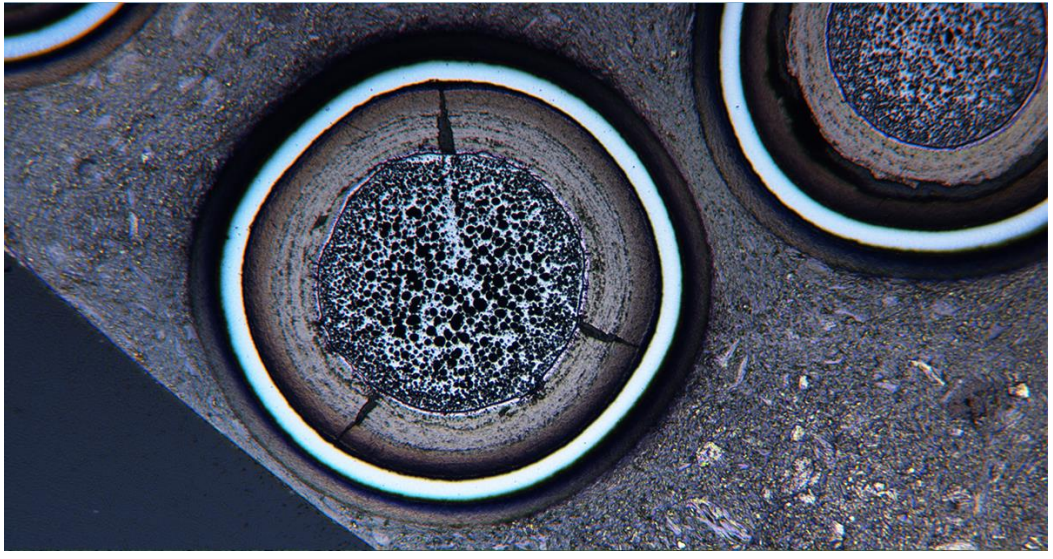


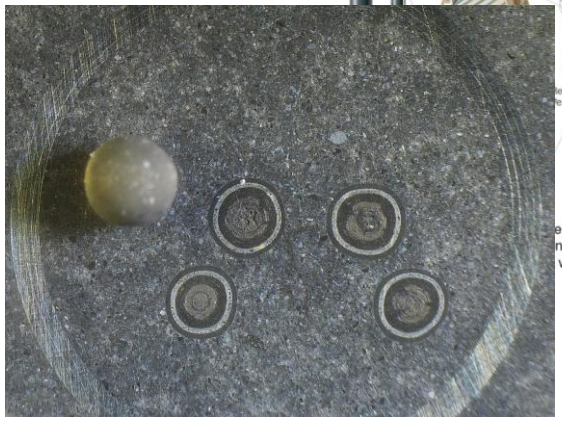


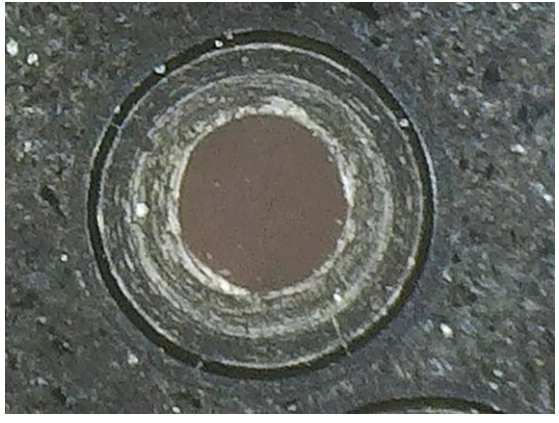
The reactor vessel's main role is to contain the nuclear chain reaction and the pressure caused by heating the water in the reactor core.

Pastylka paliwowa: akumulacja defektów prowadzi do spękania ceramiki i może zablokować warstwę gazu pomiędzy paliwem a koszulką.

Materiały i defektowanie w reaktorze



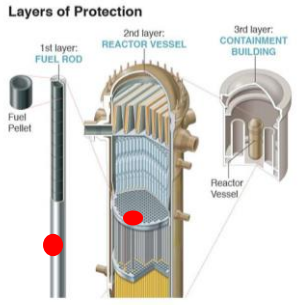


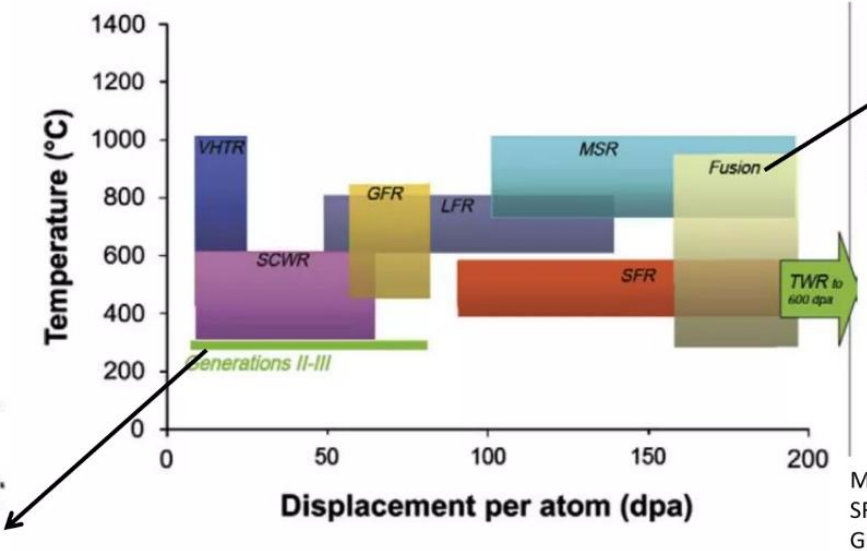


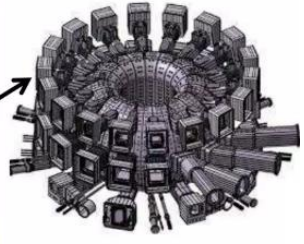
<u>Pastylka paliwowa:</u> akumulacja defektów prowadzi do spękania ceramiki i może zablokować warstwę gazu pomiędzy paliwem a koszulką. Problem nie istnieje w paliwie TRISO.

www.energy.gov/ne/articles/triso-particles-most-robust-nuclear-fuel-earth

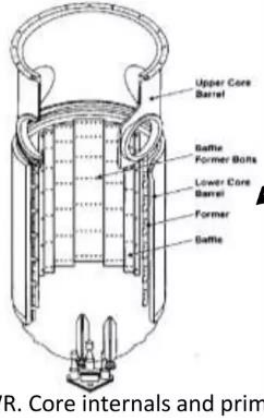
Materiały i defektowanie w reaktorze







ITER. First wall in 316LN

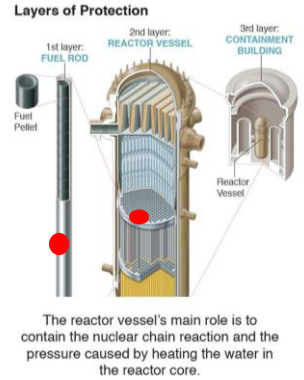


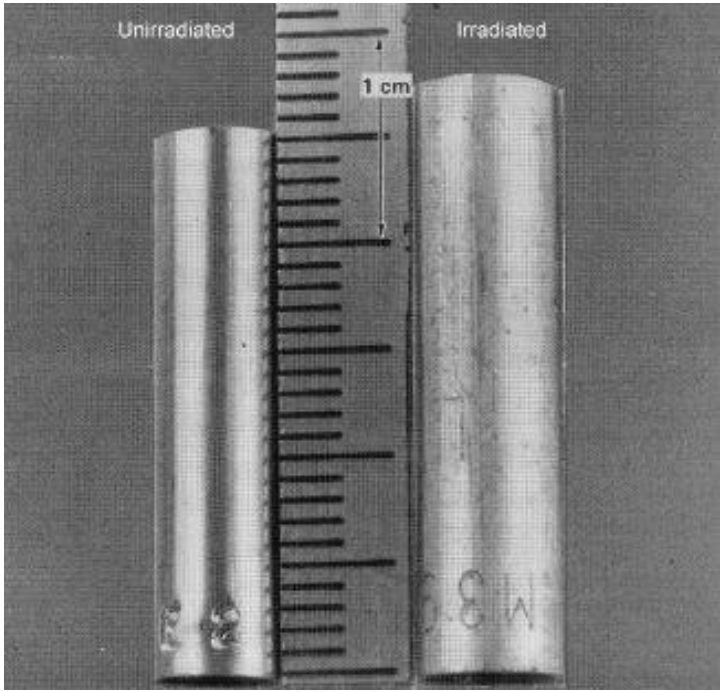
PWR. Core internals and primary system components in 304/316

MSR: Molten Salt
SFR: Sodium Fast
GFR: Gas-cooled Fast
SCWR: Supercritical Water
VHTR: Very High Temperature
LFR: Lead-cooled Fast
TWR: Travelling Wave

Zinkle et al., 2013

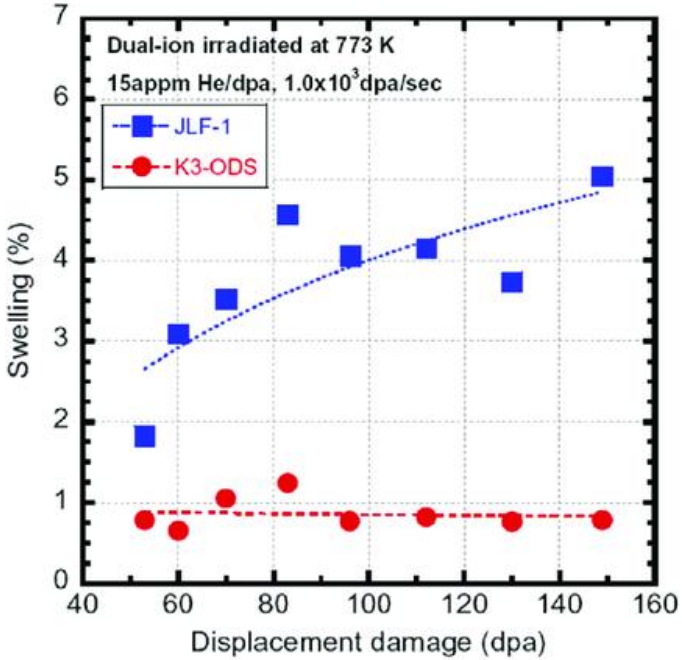
Materiały i defektowanie w reaktorze

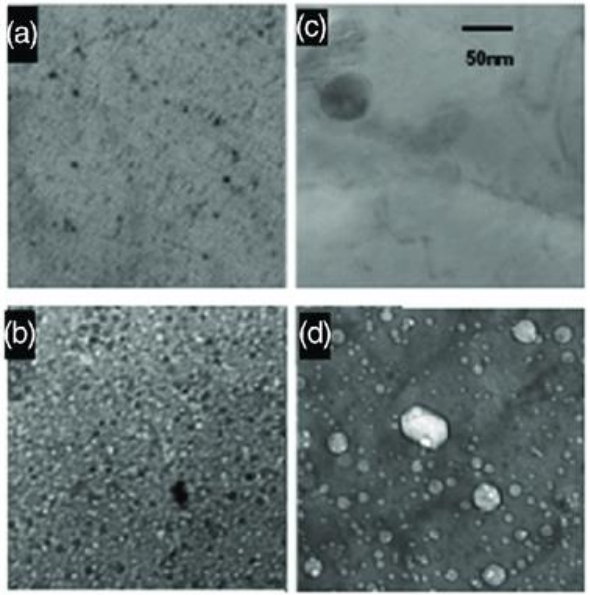


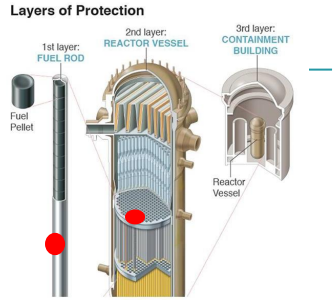


Swelling: akumulacja defektów prowadzi do znacznego wzrostu rozmiarów detali, w przypadku stali nawet 10%.

Materiały i defektowanie w reaktorze



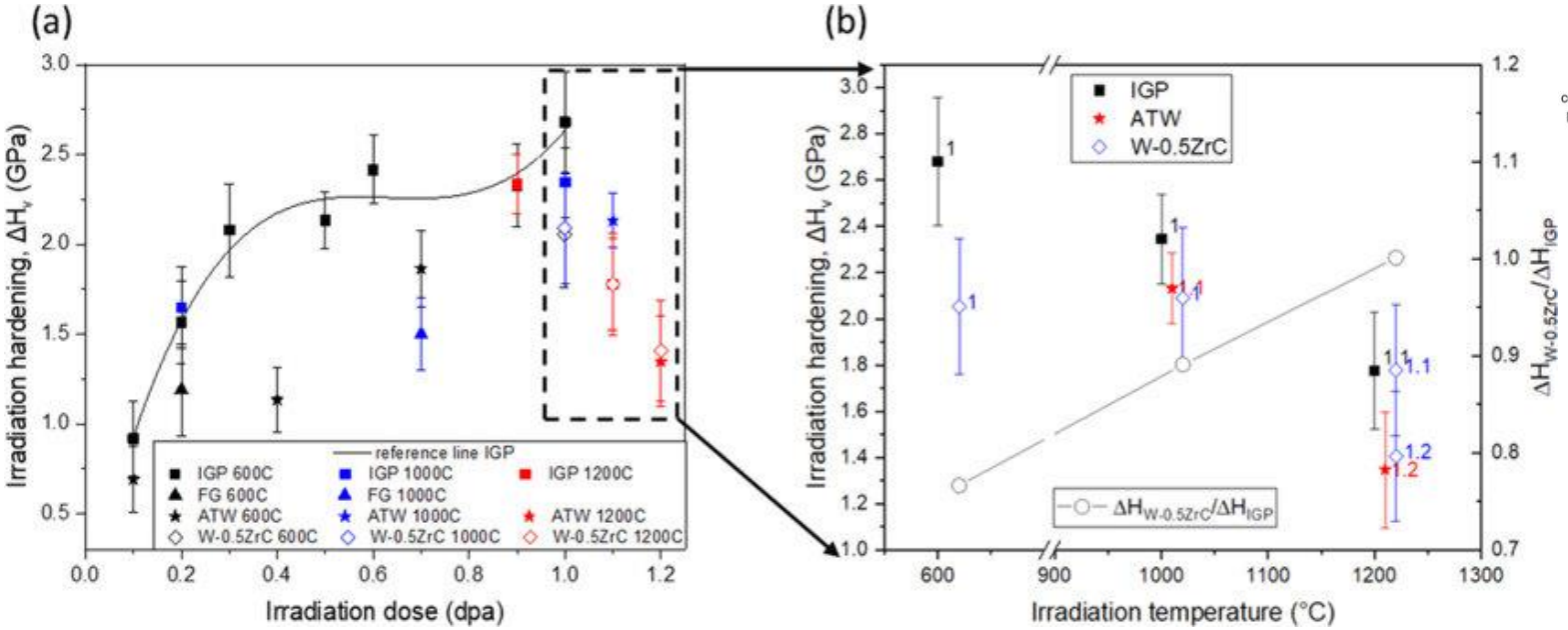


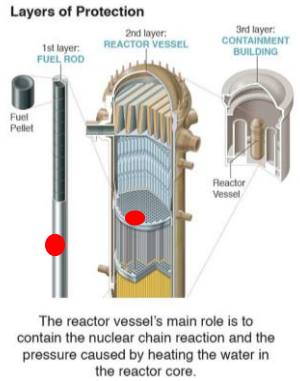


The reactor vessel's main role is to contain the nuclear chain reaction and the pressure caused by heating the water in the reactor core.

Swelling: może być znacząco zredukowany dzięki nowym materiałom np. stalom ODS (Oxide Dispersed Strenghtening).

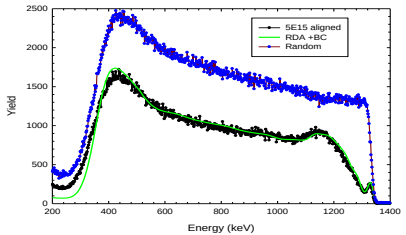
Materiały i defektowanie w reaktorze

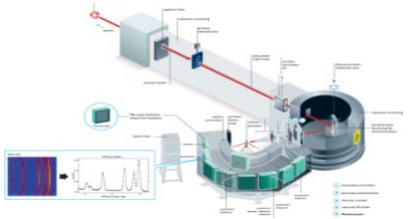


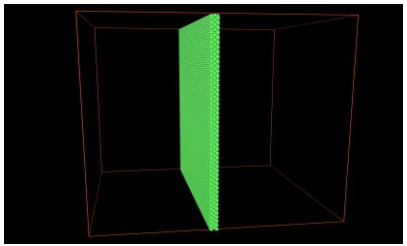


Utwardzanie: może prowadzić do kruchości

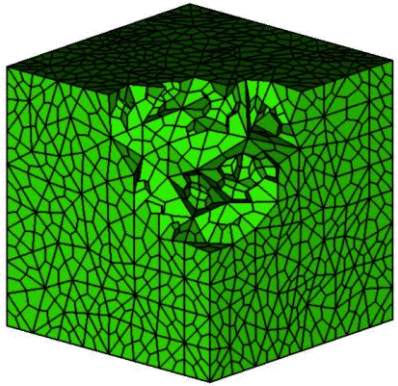
Strategia







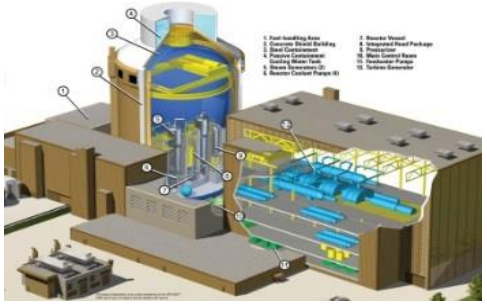
Modelowanie od MD po FE



Symulacje
I badania strukturalne



Właściwości
funkcjonalne





Zastosowania
przemysłowe

1 nm / 1 ps

1 mm / 1 s

1 cm / 1 h

10 m / 10 years



Co jest do zrobienia ?

- Kwalifikacja materiałów i komponentów do stosowania w EJ
- Badania spawów zgodnie z normami (np. ASME NQA 1)
- Badania próbek świadków z instalacji jądrowej
- Badania wyprzedzające:
  - *Miniaturyzacja próbek do badań mechanicznych (SSJ3, SSJ2, MT2, SPT)*
  - *Wyznaczanie ”master curve” z danych nanoindentacyjnych*
  - *Badanie korozji naprężeniowej*
  - *Opracowanie metod modelowania defektowania neutronami przy użyciu wiązek jonów*
  - *Opracowanie predyktywnych modeli zachowania materiałów w długim okresie czasu*
  - *Nowe materiały: ODS, HEA, SCSA, …*
  - *Matryce immobilizacji odpadów radioaktywnych*









Uwarunkowania formalne

- Wdrożenie energetyki jądrowej w Polsce powinno stworzyć nowy model współpracy pomiędzy państwem, przemysłem i ośrodkami naukowymi, w którym chodzi o realizację strategicznych celów.

- Stosowane na świecie rozwiązania obejmują dedykowane modele finansowania takiej współpracy.

- Konieczne jest uwzględnienie długofalowych działań w całym okresie eksploatacji EJ

- Alternatywą dla krajowego programu badań i nadzoru technicznego jest (**bardzo kosztowne**) zlecanie badań technicznych do ośrodków zagranicznych.

Kontakt:

Jacek Jagielski
Head of the NOMATEN TEAMING for Excellence Project
Director of Material Physics Department
National Centre for Nuclear Research
e-mail: Jacek.Jagielski@ncbj.gov.pl
phone: +48 22 273 1443



Dziękuję za uwagę