

# **Skracanie czasu aktywności odpadów promieniotwórczych**

Maciej Poncyljusz

# Skracanie czasu aktywności odpadów promieniotwórczych

## Spis treści:

- Wypalone paliwo jądrowe – skład
- Dlaczego konieczne jest skrócenie czasu aktywności odpadów jądrowych?
- Sposób I – reaktory prężkie
- Sposób II – układy podkrytyczne (ADS)
- Sposób III – fuzja jądrowa

# Skracanie czasu aktywności odpadów promieniotwórczych

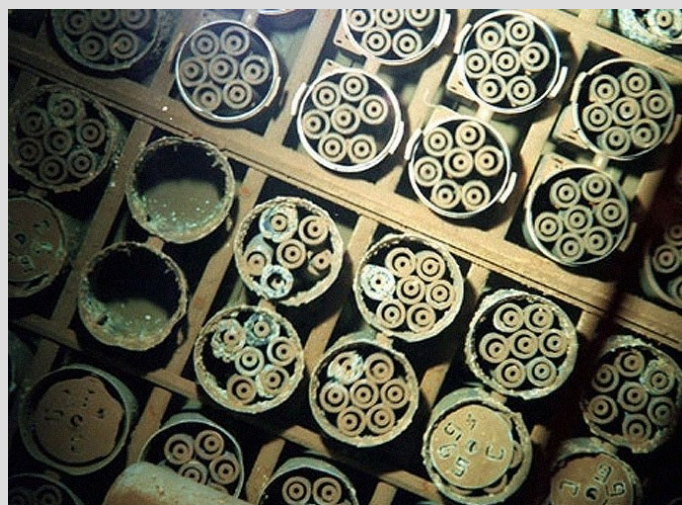
## Spis treści:

- **Wypalone paliwo jądrowe – skład**
- Dlaczego konieczne jest skrócenie czasu aktywności odpadów jądrowych?
- Sposób I – reaktory prędkie
- Sposób II – układy podkrytyczne (ADS)
- Sposób III – fuzja jądrowa

# Skracanie czasu aktywności odpadów promieniotwórczych

## Wypalone paliwo jądrowe – skład

Żeby zacząć rozmowę na temat wypalonego paliwa jądrowego należy wyjaśnić jaki jest jego skład i które jego elementy są szczególnie problematyczne.

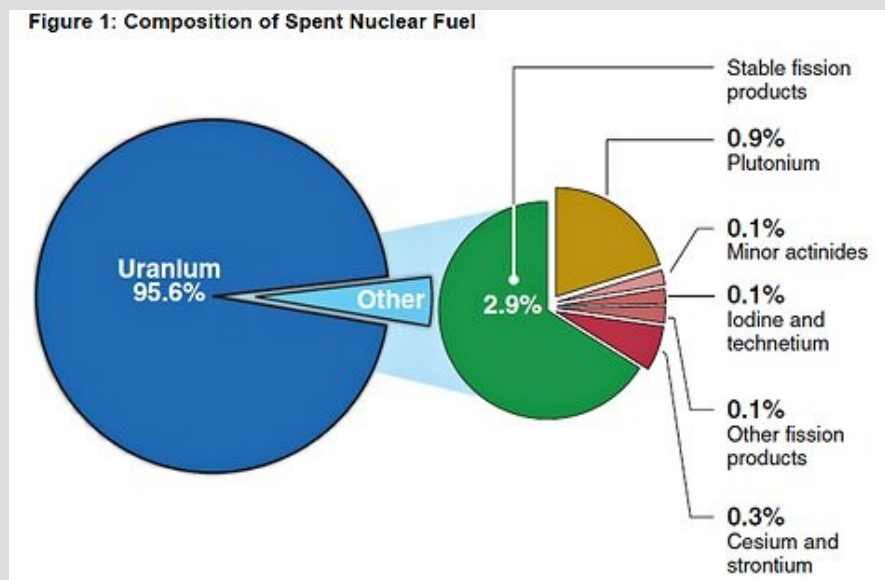


Składowisko odpadów jądrowych w Hanford, USA (źródło: [pl.wikipedia.org](http://pl.wikipedia.org))

# Skracanie czasu aktywności odpadów promieniotwórczych

## Wypalone paliwo jądrowe – skład

Wypalone paliwo jądrowe w 96% składa się z „nietkniętego” uranu. 3% stanowią produkty rozszczepienia, a 1% transuranowce.



Skład wypalonego paliwa jądrowego (źródło: nytimes.com)

# Skracanie czasu aktywności odpadów promieniotwórczych

## Wypalone paliwo jądrowe – skład

Wysoka zawartość uranu w wypalonym paliwie jądrowym wynika z niewielkiej zawartości rozszczepialnego U-235 w paliwie. Uran używany jako paliwo zawiera na ogół tylko 4% U-235, a 96% to nierozszczepialny izotop U-238. Po roku pracy reaktora zawartość spada do takiego poziomu, że nie jest możliwa reakcja łańcuchowa.

# Skracanie czasu aktywności odpadów promieniotwórczych

## Wypalone paliwo jądrowe – skład

Obecnie na skalę przemysłową z wypalonego paliwa jądrowego odzyskiwany jest uran i jeden z transuranowców pluton (dokładniej rozszczepialny Pu-239). W Europie zakładem zajmującym się przerobem wypalonego paliwa jądrowego jest La Hauge we Francji.



Zakład przerobu wypalonego paliwa jądrowego w La Hauge (źródło: [large.stanford.edu](http://large.stanford.edu))

# Skracanie czasu aktywności odpadów promieniotwórczych

## Wypalone paliwo jądrowe – skład

Pozostałe elementy wypalonego paliwa jądrowego obecnie traktowane są jako odpady i są bolączką energetyki jądrowej.



Składowisko odpadów jądrowych (źródło: nrdc.org)



# Skracanie czasu aktywności odpadów promieniotwórczych

## Wypalone paliwo jądrowe – skład

Największym problemem są transuranowce, gdyż czas ich aktywności jest liczony w tysiącach lat. Czas aktywności większości produktów aktywności jest dużo krótszy.

Tab.1. Wypalone paliwo jądrowe (główne składniki promieniotwórcze /1GW<sub>e1</sub>rok)

Nuklid	Aktynowce			Produkty rozszczepienia <sup>x</sup>		
	T <sub>1/2</sub> [a]	m [kg]		Nuklid	T <sub>1/2</sub> [a]	M [kg]
		U( <sup>235</sup> U)O <sub>2</sub>	MOX <sup>*</sup>			
<sup>235</sup> U	7.0 · 10 <sup>8</sup>	280	20	<sup>85</sup> Kr	10.8	0.4
<sup>236</sup> U	2.3 · 10 <sup>7</sup>	120	10	<sup>90</sup> Sr	29	14
<sup>238</sup> U	4.5 · 10 <sup>9</sup>	28 000	27 000	<sup>137</sup> Cs	30	32
<sup>237</sup> Np	2.1 · 10 <sup>6</sup>	15	10	<sup>151</sup> Sm	93	0.3
<sup>238</sup> Pu	88	6	3.5%	<sup>93</sup> Zr	1.5 · 10 <sup>6</sup>	23
<sup>239</sup> Pu	2.4 · 10 <sup>4</sup>	170	47.5%	<sup>99</sup> Tc	2.1 · 10 <sup>5</sup>	25
<sup>240</sup> Pu	6600	70	27%	<sup>107</sup> Pd	6.5 · 10 <sup>6</sup>	7
<sup>241</sup> Pu	14	40	11%	<sup>129</sup> I	1.6 · 10 <sup>7</sup>	6
<sup>242</sup> Pu	3.8 · 10 <sup>5</sup>	15	10%	<sup>135</sup> Cs	2 · 10 <sup>6</sup>	10
<sup>241</sup> Am	430	7	28			
<sup>242m</sup> Am	141	0.1	0.2			
<sup>243</sup> Am	7370	3	25			
<sup>244</sup> Cm	18	0.7	15			
<sup>245</sup> Cm	8500	0.1	3			

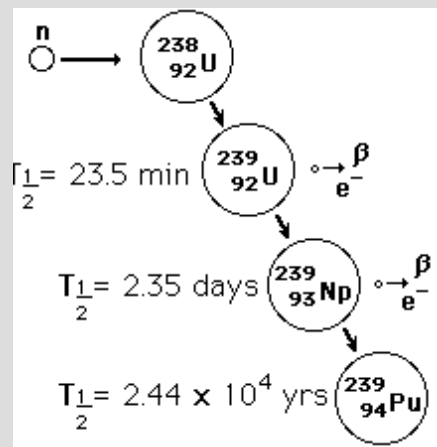
<sup>\*</sup> wartości przybliżone dla Mixed OXide fuel  
x U(<sup>235</sup>U)

Izotopy znajdujące się w wypalonym paliwie jądrowym (źródło: fuw.edu.pl)

# Skracanie czasu aktywności odpadów promieniotwórczych

## Wypalone paliwo jądrowe – skład

Transuranowce powstają w wyniku pochłonięcia neutronu przez jądro uranu. Najczęściej powstają, gdy neutron zostanie pochłonięty przez jądro U-238, ale zdarza się, że jądro U-235 po pochłonięciu neutronu nie rozszczepi się i wyprodukuje jądro transuranowca

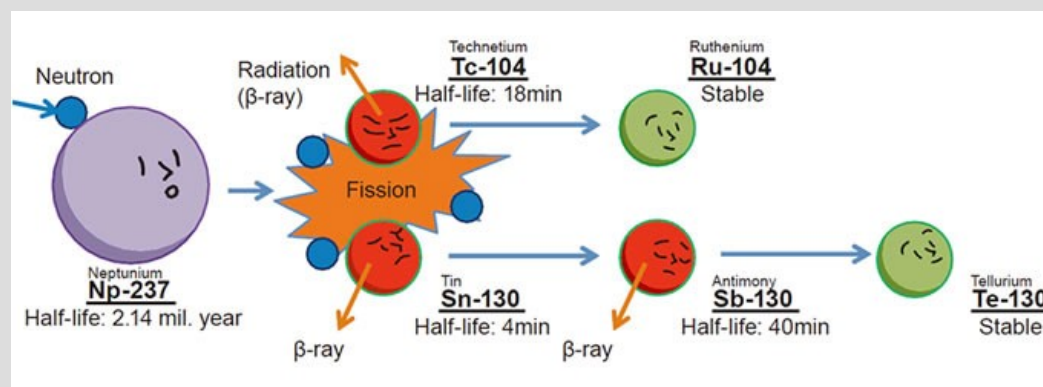


Powstawanie jąder izotopu Pu-239 po pochłonięciu neutronu przez jądro U-238. (źródło: [ibphysicsguide.weebly.com](http://ibphysicsguide.weebly.com))

# Skracanie czasu aktywności odpadów promieniotwórczych

## Wypalone paliwo jądrowe – skład

Problem transuranowców można rozwiązać rozszczepiając je jak jądra uranu U-235 lub Pu-239, jednak w odróżnieniu od uranu i plutonu rozszczepienie transuranowców wymaga stworzenia odpowiednich warunków (wyższa masa krytyczna, neutrony o dużych energiach – prędkie). Takie warunki mogą zapewnić jedynie reaktory IV generacji



Rozszczepienie jądra Np-237 (źródło: [snsr.jaea.go.jp](http://snsr.jaea.go.jp))

# Skracanie czasu aktywności odpadów promieniotwórczych

## Spis treści:

- Wypalone paliwo jądrowe – skład
- **Dlaczego konieczne jest skrócenie czasu aktywności odpadów jądrowych?**
- Sposób I – reaktory prędkie
- Sposób II – układy podkrytyczne (ADS)
- Sposób III – fuzja jądrowa

# **Skracanie czasu aktywności odpadów promieniotwórczych**

## **Dlaczego konieczne jest skrócenie czasu aktywności odpadów jądrowych?**

Skoro ponad 90% można ponownie użyć jako paliwo jądrowe, a najbardziej problematyczne transuranowce stanowią 1% całego wypalonego paliwa, pojawia się pytanie o sens rozszczepiania transuranowców.

# **Skracanie czasu aktywności odpadów promieniotwórczych**

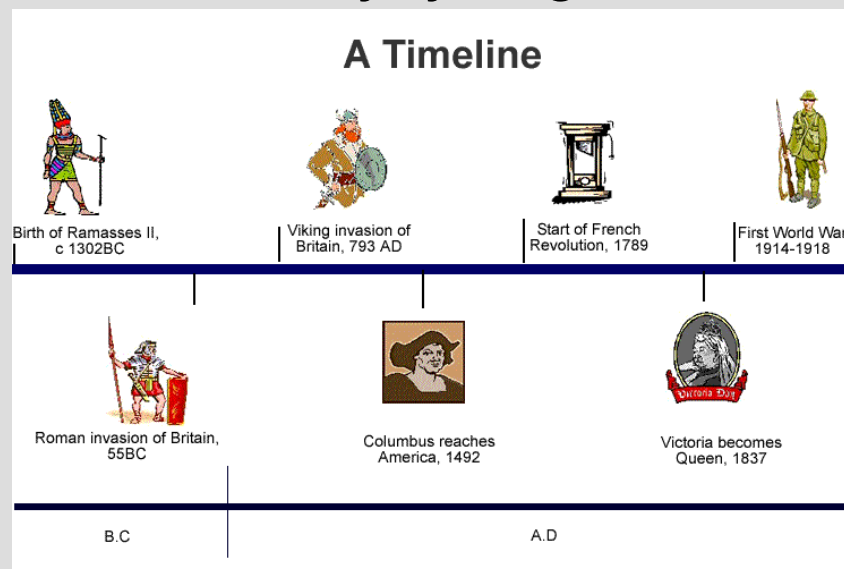
**Dlaczego konieczne jest skrócenie czasu aktywności odpadów jądrowych?**

Podstawowym powodem jest fakt, że czas życia transuranowców liczony jest w tysiącach lat.

# Skracanie czasu aktywności odpadów promieniotwórczych

**Dlaczego konieczne jest skrócenie czasu aktywności odpadów jądrowych?**

Gdyby starożytni Rzymianie posiadali współcześnie używane elektrownie jądrowe, odpady jądrowe, wciąż stanowiłyby zagrożenie.



Oś czasu (źródło: [community.dur.ac.uk](http://community.dur.ac.uk))

# Skracanie czasu aktywności odpadów promieniotwórczych

## Dlaczego konieczne jest skrócenie czasu aktywności odpadów jądrowych?

Pozbycie się transuranowców pozwoliłoby znacząco skrócić czas aktywności z (tysiący lat do ok. 300)

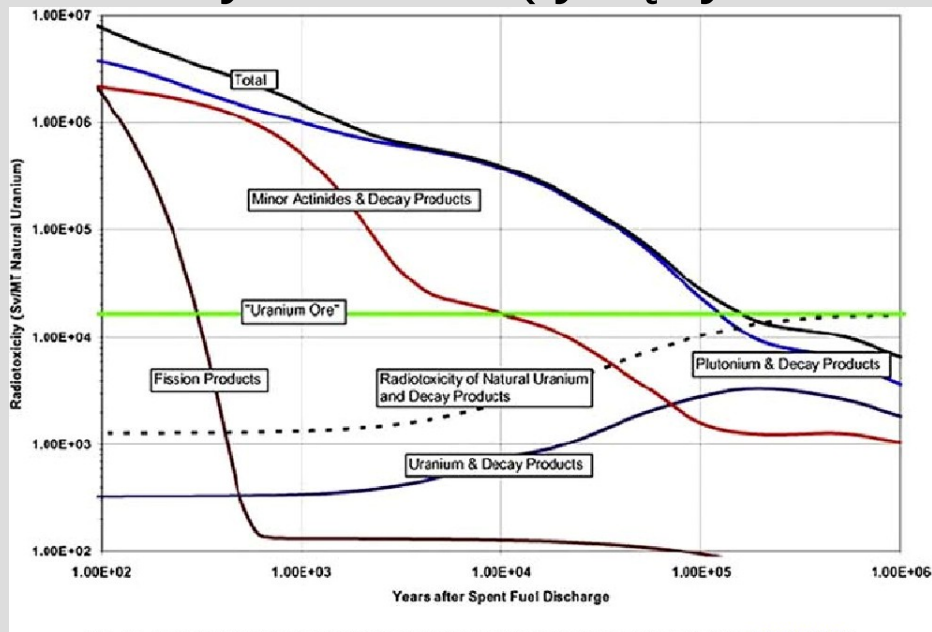


Fig. 11 Radiotoxicity of spent nuclear fuel and its evolution in time (OECD, 2006)

Czas aktywności wypalonego paliwa jądrowego (z transuranowcami i po ich rozszczepieniu) (źródło: energycentral.com)



# Skracanie czasu aktywności odpadów promieniotwórczych

## Dlaczego konieczne jest skrócenie czasu aktywności odpadów jądrowych?

Transuranowce mogą stanowić również paliwo jądrowe. Z 1 tony transuranowców zawartych w odpadach jądrowych można byłoby wytwarzać przez rok **2500 MW** mocy.



Współczesna energetyka jądrowa uzyskuje jedynie wisienkę na torcie w porównaniu z energią jaką można uzyskać (źródło: [economictimes.indiatimes.com](http://economictimes.indiatimes.com))

# Skracanie czasu aktywności odpadów promieniotwórczych

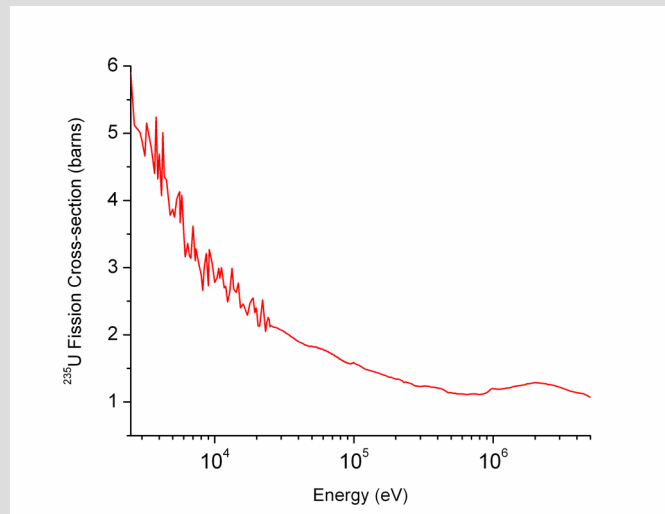
## Spis treści:

- Wypalone paliwo jądrowe – skład
- Dlaczego konieczne jest skrócenie czasu aktywności odpadów jądrowych?
- **Sposób I – reaktory prędkie**
- Sposób II – układy podkrytyczne (ADS)
- Sposób III – fuzja jądrowa

# Skracanie czasu aktywności odpadów promieniotwórczych

## Sposób I – reaktory prężkie

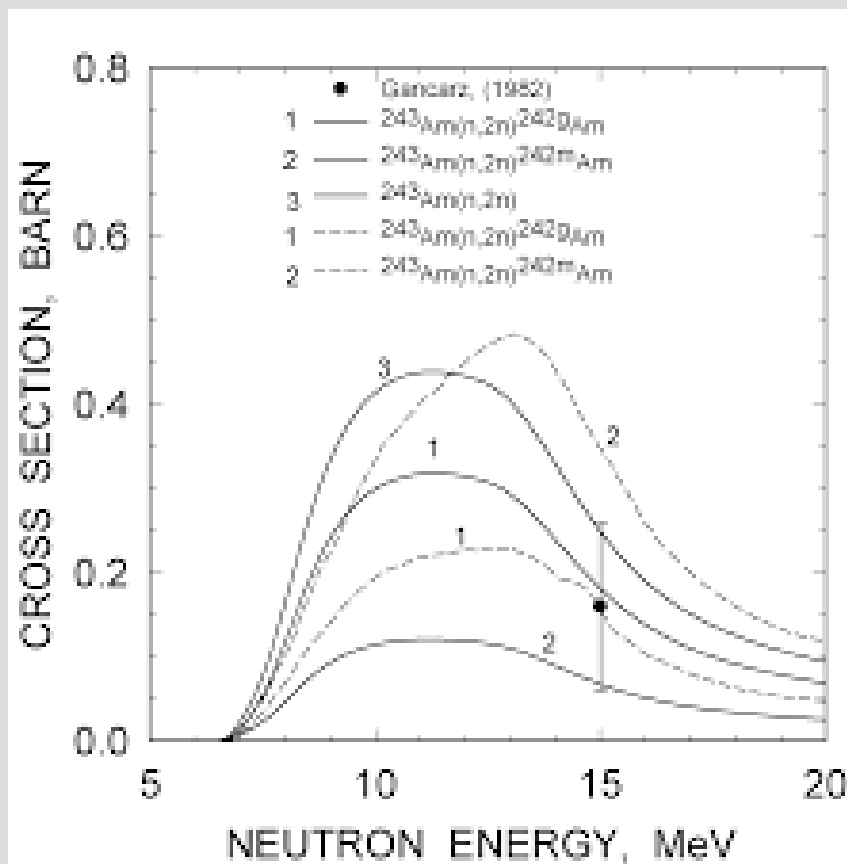
Do powszechnie używanego w energetyce jądrowej rozszczepienia U-235 używa się neutronów termicznych (o niskich energiach), gdyż mają największy przekrój na zainicjowanie reakcji. Jednak w przypadku transuranowców potrzebujemy neutronów prężkich (o wysokich energiach).



Przekrój czynny na rozszczepienie U-235 w zależności od energii neutronu (źródło: commons.wikimedia.org)

# Skracanie czasu aktywności odpadów promieniotwórczych

## Sposób I – reaktory prężkie

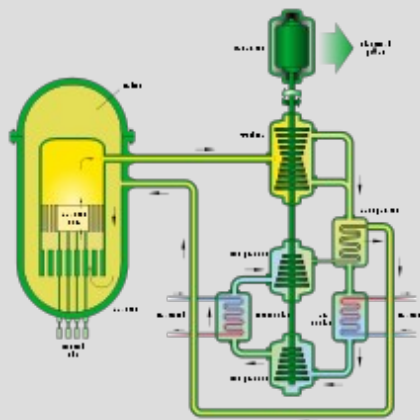


Przekroje czynne wybranych transuranowców (źródło: Journal of the Korean Physical Society)

# Skracanie czasu aktywności odpadów promieniotwórczych

## Sposób I – reaktory prężkie

Reaktory prężkie nie mają moderatora. Ponieważ woda będąca często używana jako chłodziwo spowalnia neutrony, w reaktorach prężkich musi być zastosowane inne chłodziwo. Najczęściej stosuje się ciekłe metale (sód, ołów), gdyż nie spowalniają neutronów.



Schemat przykładowego reaktora prężkiego (źródło: pl.wikipedia.org)

# Skracanie czasu aktywności odpadów promieniotwórczych

## Sposób I – reaktory prężkie

Paliwem obecnie używanych reaktorów prężkich jest wysokowzbogacony uran U-235 (przekrój czynny dla neutronów prężkich to tylko 1,5 barna) , jednak ich paliwem mogą być transuranowce. Jednak ich masa w reaktorze musi być większa od masy krytycznej (dla Am-241 to 57,6 kg, a dla Np-237 to 60 kg). Duże wartości masy krytycznej mogą być utrudnieniem.

# Skracanie czasu aktywności odpadów promieniotwórczych

## Sposób I – reaktory prężkie

Reaktory prężkie mają dużą gęstość mocy, dlatego używane są jako napęd okrętów podwodnych.



Przykład okrętu podwodnego o napędzie jądrowym (źródło: epa.gov)

# Skracanie czasu aktywności odpadów promieniotwórczych

## Sposób I – reaktory prężkie

Przykładem reaktora prężkiego na lądzie jest reaktor Superphenix uruchomiony w 1986. Reaktor oprócz wytwarzania energii służył do powielania paliwa, czyli wytwarzania paliwa z tzw. materiału paliworodnego (w tym przypadku z U-238 na Pu-239).



Reaktor prężki Superphenix (źródło: en.wikipedia.org)



# Skracanie czasu aktywności odpadów promieniotwórczych

## Sposób I – reaktory prężkie

Istnieje też możliwość produkcji neutronów prężkich w klasycznym reaktorze jądrowym. Służy do tego konwerter neutronów opracowany przez polskich naukowców z NCBJ w Świerku.

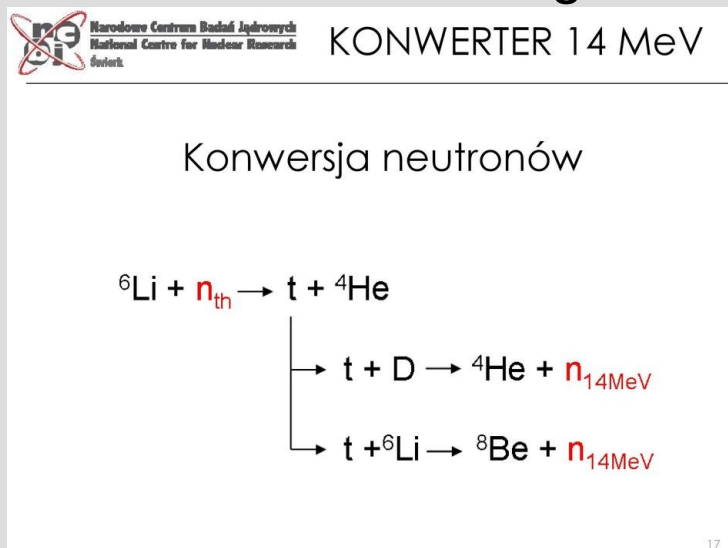


Konwerter neutronów (źródło: ncbj.gov)

# Skracanie czasu aktywności odpadów promieniotwórczych

## Sposób I – reaktory prężkie

Konwerter składa się z deuterku litu-6. Pod wpływem neutronu termicznego lit rozszczepia się na hel i tryt o energii 2,7 MeV. Tryt o takiej energii uderza w jądro deuteru. Pod wpływem uderzenia powstaje hel i neutron o energii 14 MeV.



Reakcje zachodzące w konwerterze (źródło: ncbj.org)

# Skracanie czasu aktywności odpadów promieniotwórczych

## Sposób I – reaktory prężkie

Zainteresowanych informacjami dotyczącymi reakcji jakie zachodzą w konwerterze neutronów odsyłam do poniższego posta: [https://m.facebook.com/story.php?story\\_fbid=3321760111190756&id=254941491205982](https://m.facebook.com/story.php?story_fbid=3321760111190756&id=254941491205982)

# Skracanie czasu aktywności odpadów promieniotwórczych

## Sposób I – reaktory prężkie

Niestety przekrój czynny na reakcję deuteru z trytem dla energii 2,7 MeV nie jest zbyt wysoki i reakcja zachodzi rzadko.

# Skracanie czasu aktywności odpadów promieniotwórczych

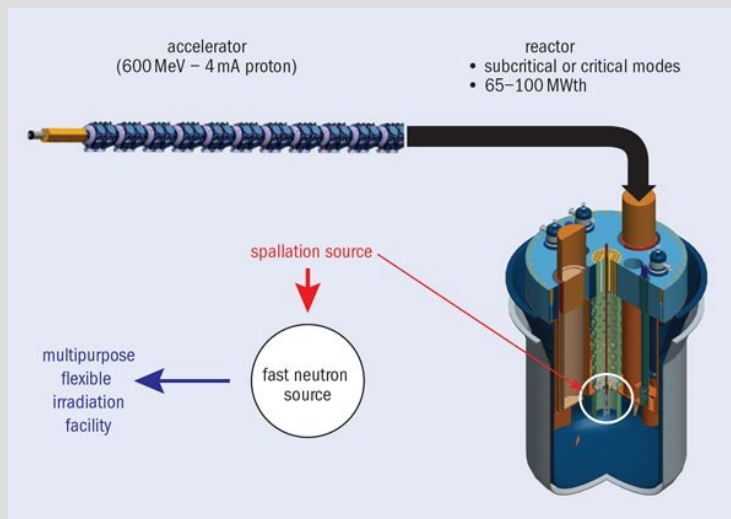
## Spis treści:

- Wypalone paliwo jądrowe – skład
- Dlaczego konieczne jest skrócenie czasu aktywności odpadów jądrowych?
- Sposób I – reaktory prężkie
- **Sposób II – układy podkrytyczne (ADS)**
- Sposób III – fuzja jądrowa

# Skracanie czasu aktywności odpadów promieniotwórczych

## Sposób II – układy podkrytyczne (ADS)

Układy podkrytyczne składają się z reaktora prędkiego chłodzonego ołowiem lub bizmutem (ewentualnie rtęcią) oraz akceleratora.

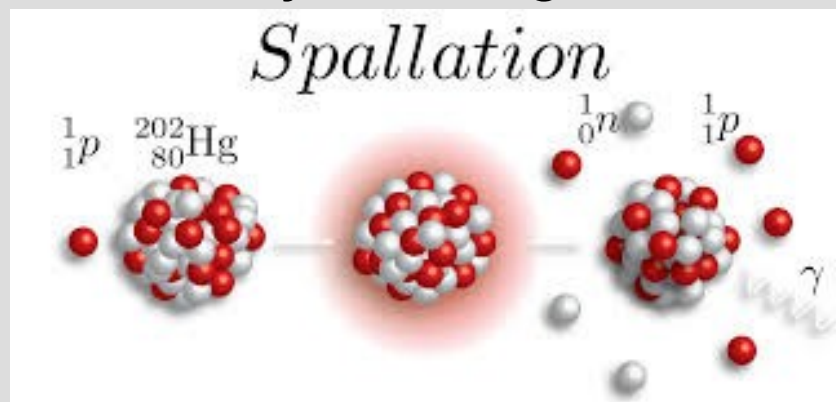


Reaktor ADS (źródło:cerncourier.com)

# Skracanie czasu aktywności odpadów promieniotwórczych

## Sposób II – układy podkrytyczne (ADS)

Akcelerator przyspiesza protony, które uderzają w jądro atomu użytego jako chłodziwo (np. ołowiu). W wyniku uderzenia zachodzi rozpad jądra i emisja neutronów o dużych energiach



Spallacja jądra ołowiu (źródło: dtu.dk)

# Skracanie czasu aktywności odpadów promieniotwórczych

## Sposób II – układy podkrytyczne (ADS)

Neutrony te uderzają w jądra izotopu będącego paliwem.

Nie jest konieczne zachowanie warunków reakcji łańcuchowej, gdyż mamy źródło neutronów zasilające reakcję. Pracę reaktora można w każdej chwili przerwać.

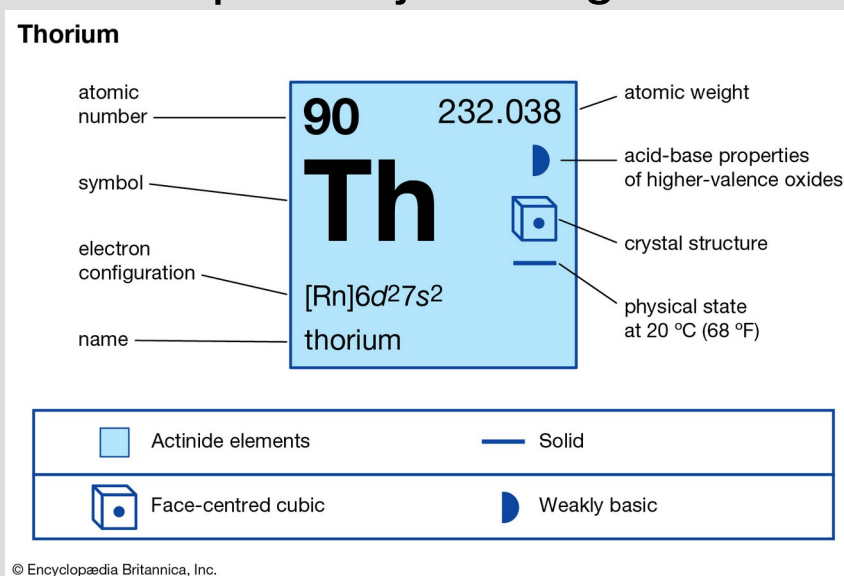
Reaktor pracuje na neutronach prędkich, więc paliwem mogą być transuranowce.



# Skracanie czasu aktywności odpadów promieniotwórczych

## Sposób II – układy podkrytyczne (ADS)

Reaktory podkrytyczne są rozpatrywane jako reaktory pracujące na torze Th-232. Izotop ten nie jest rozszczepialny, ale pod wpływem neutronów powstaje z niego rozszczepialny U-233.

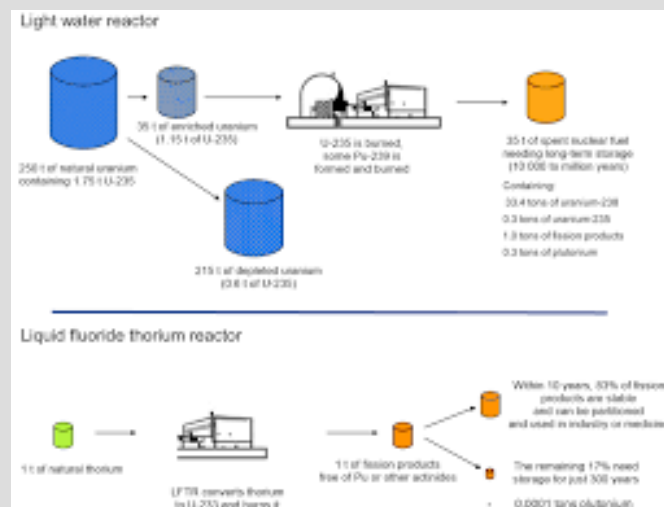


Tor – pierwiastek (źródło: britannica.com)

# Skracanie czasu aktywności odpadów promieniotwórczych

## Sposób II – układy podkrytyczne (ADS)

Tor jest rozpatrywany jako jądrowe paliwo przyszłości, gdyż produkuje dużo mniej odpadów promieniotwórczych niż paliwo uranowe. 83% wypalonego paliwa, po 10 latach jest stabilna, a 17% po 300 latach. Stopień wypalenia jest też dużo lepszy od uranu.



Wypalone paliwo jądrowe z cyklu torowo-uranowego (źródło: large.stanford.edu)

# Skracanie czasu aktywności odpadów promieniotwórczych

## Sposób II – układy podkrytyczne (ADS)

Koncepcję takiego reaktora w 1993 opracował Carlo Rubbia, były dyrektor generalny CERN

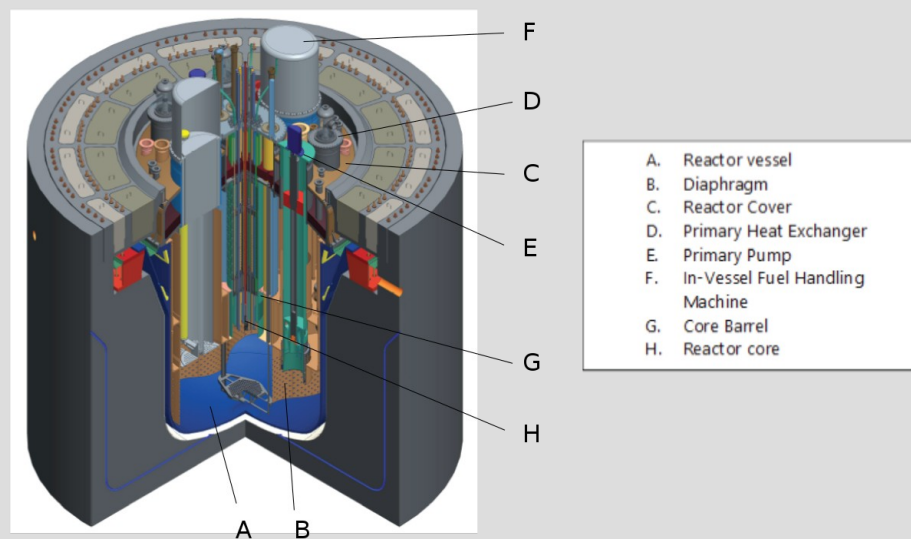


Carlo Rubbia (źródło: [home.cern](http://home.cern))

# Skracanie czasu aktywności odpadów promieniotwórczych

## Sposób II – układy podkrytyczne (ADS)

Pierwszym reaktorem tego typu będzie eksperymentalny reaktor MYRRHA, który zostanie oddany do użytku w 2036 w Belgii



Schemat reaktora MYRRHA (źródło: en.wikipedia.org)

# Skracanie czasu aktywności odpadów promieniotwórczych

## Spis treści:

- Wypalone paliwo jądrowe – skład
- Dlaczego konieczne jest skrócenie czasu aktywności odpadów jądrowych?
- Sposób I – reaktory prężkie
- Sposób II – układy podkrytyczne (ADS)
- **Sposób III – fuzja jądrowa**

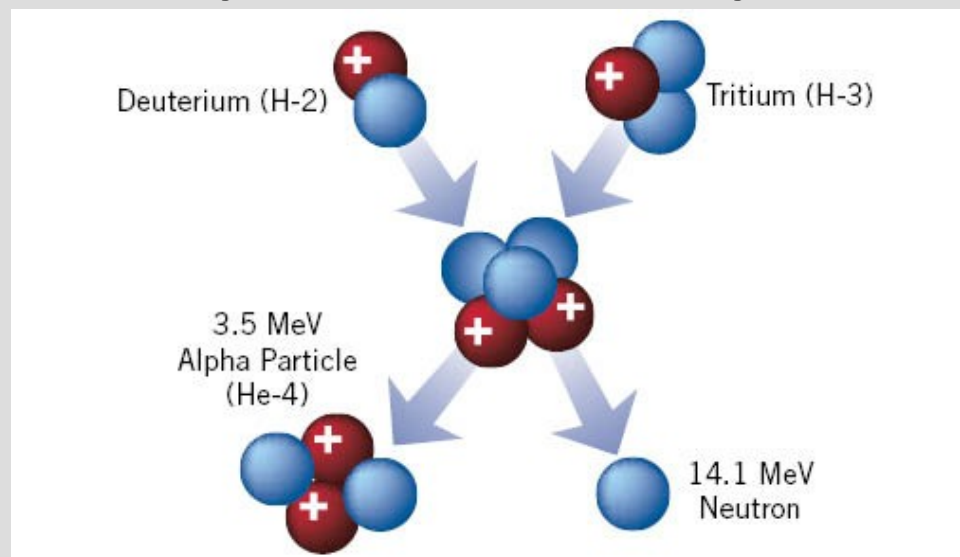
# Skracanie czasu aktywności odpadów promieniotwórczych

## Sposób III – fuzja jądrowa

Fuzja jądrowa jest uważana jako źródło energii przyszłości.

Polega ona na łączeniu lekkich cząstek ( $A < 56$ ).

Rozpatrywaną reakcją w zastosowaniu energetycznym jest synteza deuteru i trytu.

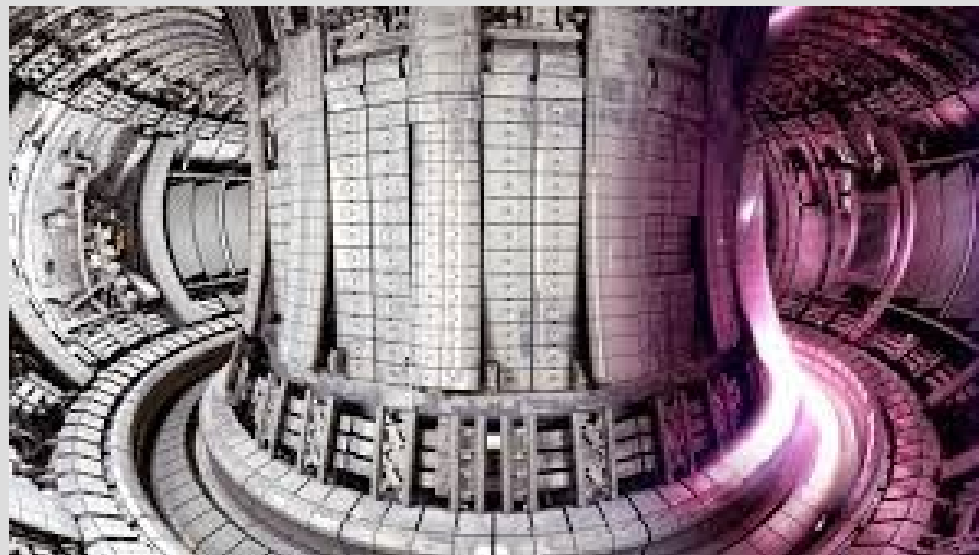


Reakcja fuzji deuteru i trytu (źródło: nuclearconnect.org)

# Skracanie czasu aktywności odpadów promieniotwórczych

## Sposób III – fuzja jądrowa

Doprowadzenie fuzji wymaga wytworzenia plazmy, co jest trudnym zadaniem i konieczne jest włożenie energii. Do tej pory nie dało się uzyskać dodatniego bilansu energetycznego.



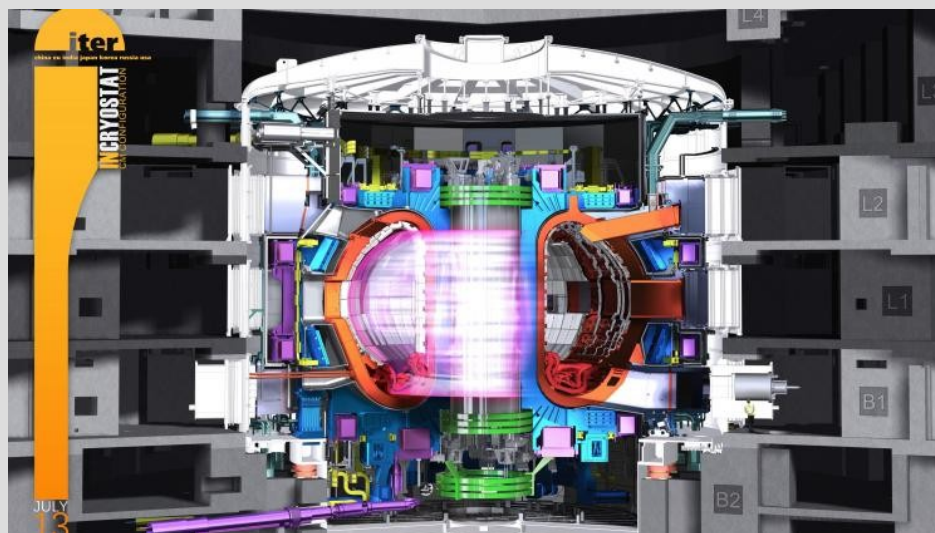
Wnętrze tokamaka JET (źródło: [eurofusion.org](http://eurofusion.org))

# Skracanie czasu aktywności odpadów promieniotwórczych

## Sposób III – fuzja jądrowa

Pierwszym reaktorem, który ma wytwarzać więcej energii niż się do niego wkłada ma być tokamak ITER.

Uruchomiony ma zostać w 2025 we Francji. Będzie wytwarzać 500 MW mocy cieplnej, przy wkładzie 50 MW.



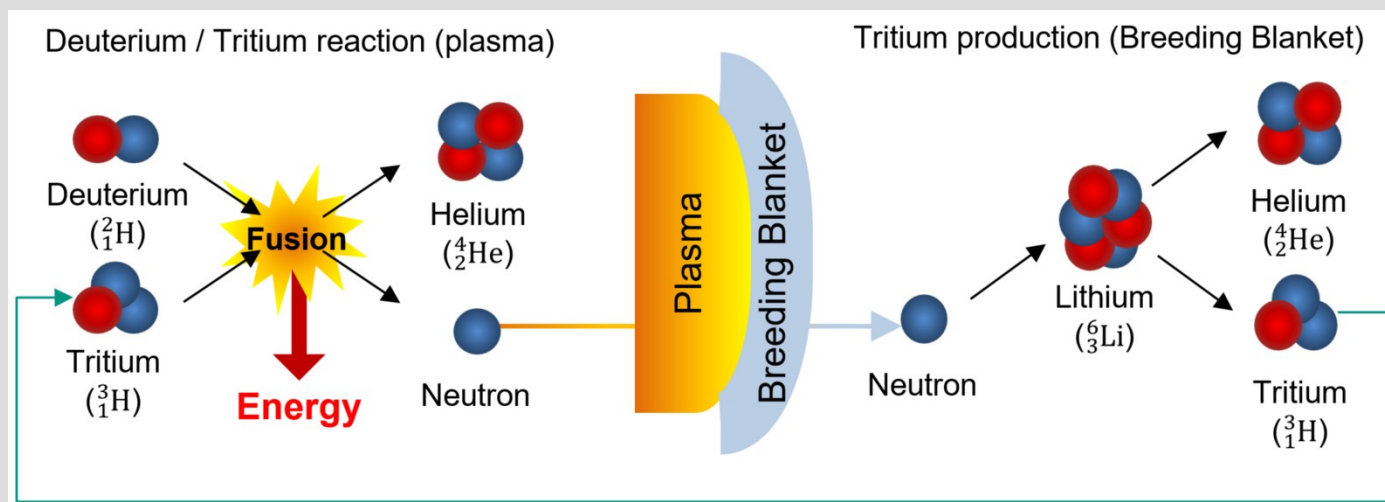
Tokamak ITER (źródło: [naukawpolsce.pap.pl](http://naukawpolsce.pap.pl))



# Skracanie czasu aktywności odpadów promieniotwórczych

## Sposób III – fuzja jądrowa

W reaktorze tym będzie zachodzić fuzja deuteru i trytu, w wyniku której powstaje neutron o energii 14 MeV. Neutron ten uderza w jądro litu-6, który będzie otaczał reaktor. W wyniku zderzenia jądro litu rozszczepia się na hel i tryt, generując ciepło. Rozszczepienie litu-6 jest egzoenergetyczne (energia: 4,8 MeV)

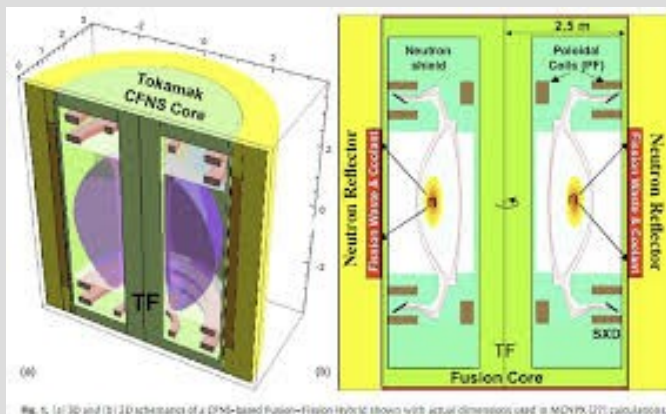


Reakcja litu z neutronem (źródło: eurofusion.org)

# Skracanie czasu aktywności odpadów promieniotwórczych

## Sposób III – fuzja jądrowa

Neutron pochodzący z fuzji może zostać użyty do rozszczepiania jądra ciężkiego pierwiastka (np. uranu). Koncepcję reaktora hybrydowego (fuzja-rozszczepienie) rozpatrywano w latach 50. jednak uznano za nieopłacalną w stosunku do klasycznych reaktorów.



Schemat koncepcji reaktora fuzja-rozszczepienie (newenergyandfuel.com)

# Skracanie czasu aktywności odpadów promieniotwórczych

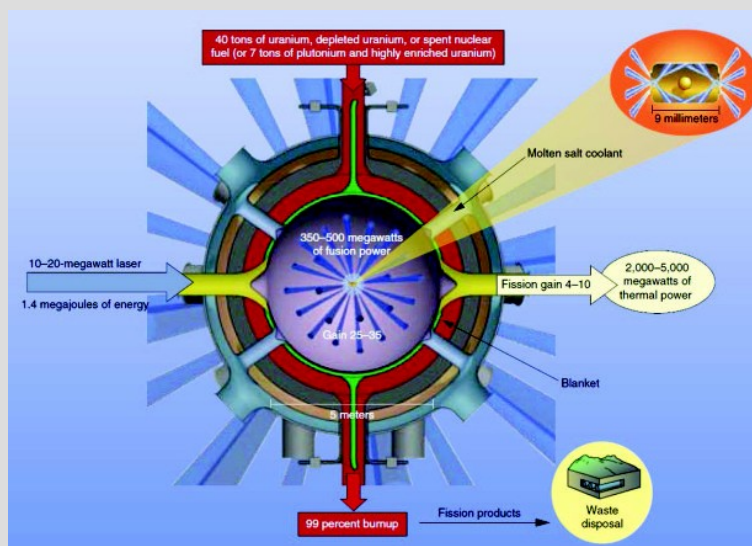
## Sposób III – fuzja jądrowa

Do pomysłu wrócono w 2009. Celem takiego reaktora nie miała być produkcja energii, lecz usuwanie odpadów jądrowych. Fuzja jądrowa byłaby źródłem neutronów o dużej energii, koniecznych do rozszczepiania transuranowców.

# Skracanie czasu aktywności odpadów promieniotwórczych

## Sposób III – fuzja jądrowa

Do tego celu skonstruowana instalacja LIFE, używająca laserów do wytwarzania fuzji jądrowej. Z przyczyn technicznych program został anulowany w 2013.

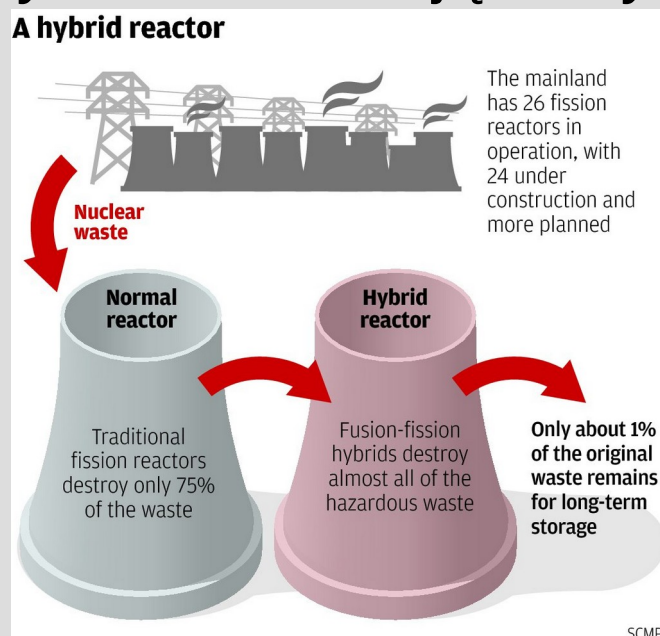


Schemat urządzenia LIFE (źródło: ee.co.za)

# Skracanie czasu aktywności odpadów promieniotwórczych

## Sposób III – fuzja jądrowa

Do 2030 Chiny chcą uruchomić reaktor fuzja-rozszczepienie. Będzie on służyć do usuwania odpadów z klasycznych reaktorów jądrowych.



Koncepcja chińskiego reaktora fuzja-rozszczepienie (źródło: scmp.com)

# Skracanie czasu aktywności odpadów promieniotwórczych

## Podsumowanie:

Jednym z ważniejszych wyzwań współczesnej energetyki jądrowej jest rozwiązanie problemów odpadów jądrowych. Jest to konieczne, gdyż nie jesteśmy w stanie zapewnić, by odpady były odseparowane od środowiska przez kilka tysięcy lat. Dodatkowo można z nich produkować energię.

# Skracanie czasu aktywności odpadów promieniotwórczych

## **Bibliografia:**

- Dias, H.; Tancock, T.; Clayton, A. "Critical mass calculations for  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{242m}\text{Am}$  and  $^{243}\text{Am}$ ". CiteSeerX 10.1.1.540.1085
- „Błędne ogniki i grzyby atomowe” R. Garwin, G. Charpak
- „Energia jądrowa. Wczoraj i dziś” G. Jezierski
- Thorium Energy Development in China, Safiyyah Abdul-Khabir
- <https://www.sciencemag.org/news/2012/01/reactor-accelerator-hybrid-achieves-successful-test-run>
- [http://web.mit.edu/fusion-fission/HybridsPubli/Hybrid\\_Fusion\\_Fission\\_Conference\\_A.pdf](http://web.mit.edu/fusion-fission/HybridsPubli/Hybrid_Fusion_Fission_Conference_A.pdf)
- Kramer, David (April 2014). "Livermore Ends Life". Physics Today. 67 (4): 26–27

# Skracanie czasu aktywności odpadów promieniotwórczych

## **Bibliografia:**

- <https://www.scmp.com/tech/science-research/article/1840219/china-aims-get-hybrid-fission-fusion-nuclear-reactor-and>
- [https://www.ifj.edu.pl/pro/fuz\\_termo/25102011/K\\_Pytel\\_NCBJ\\_25\\_10\\_2011.pdf?lang=en](https://www.ifj.edu.pl/pro/fuz_termo/25102011/K_Pytel_NCBJ_25_10_2011.pdf?lang=en)



**Dziękuję za uwagę**