



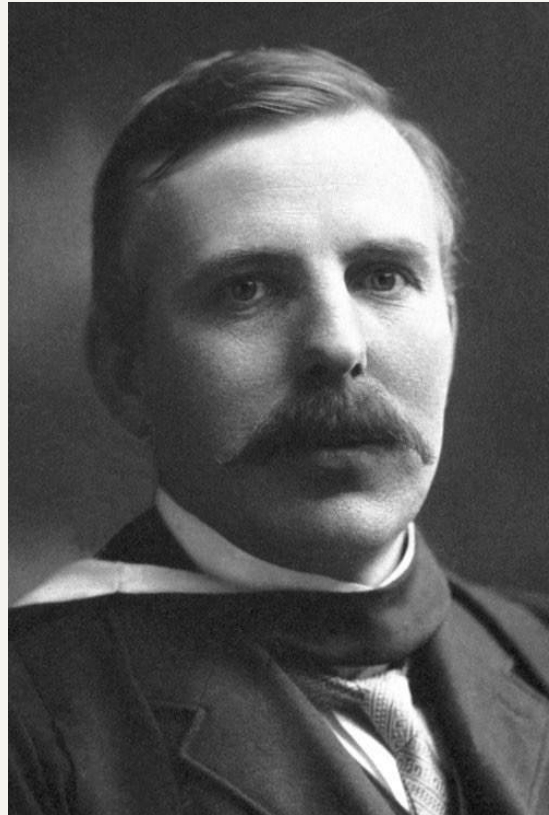
Anatomia wielkich awarii jądrowych

Renata Kierepko

Instytut Fizyki Jądrowej
Polskiej Akademii Nauk

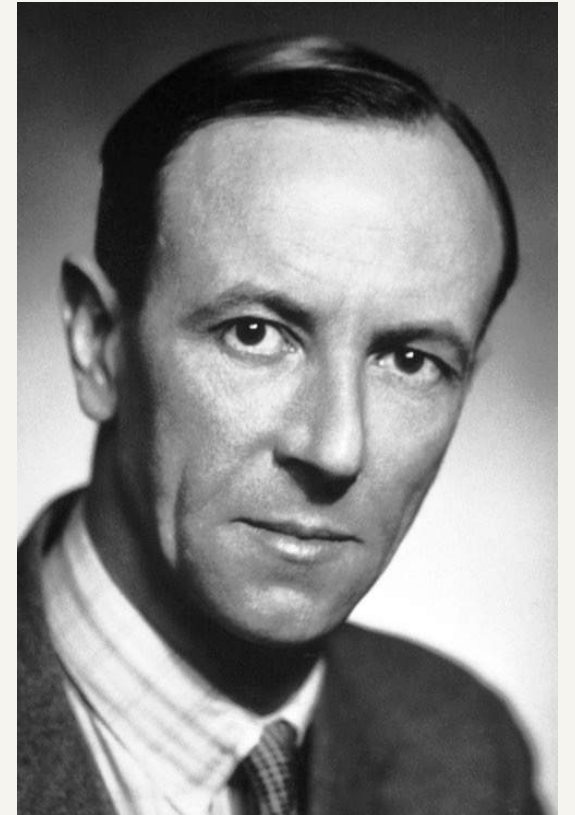
Na początku...?

Ernest Rutherford
1911 r.



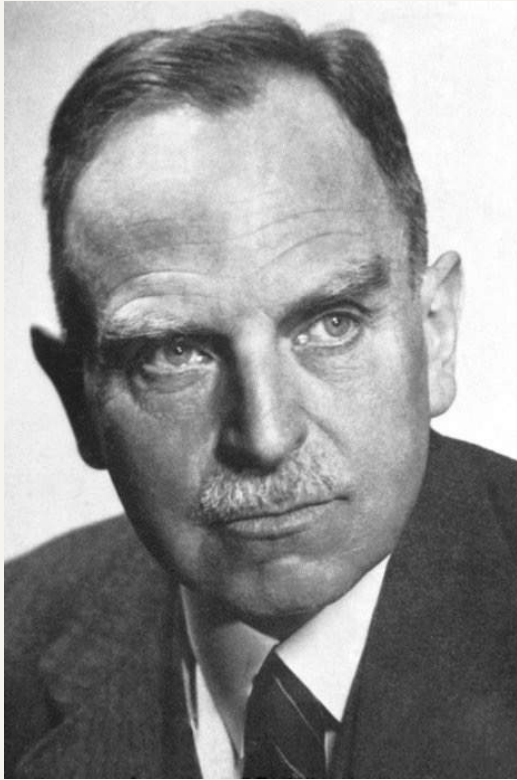
Credit: Noble Foundation archive

James Chadwick
1932 r.



Credit: Noble Foundation archive

Zaskoczenie



**Otto Hahn i
Fritz Strassmann
1938 r.**

Credit: Noble Foundation archive

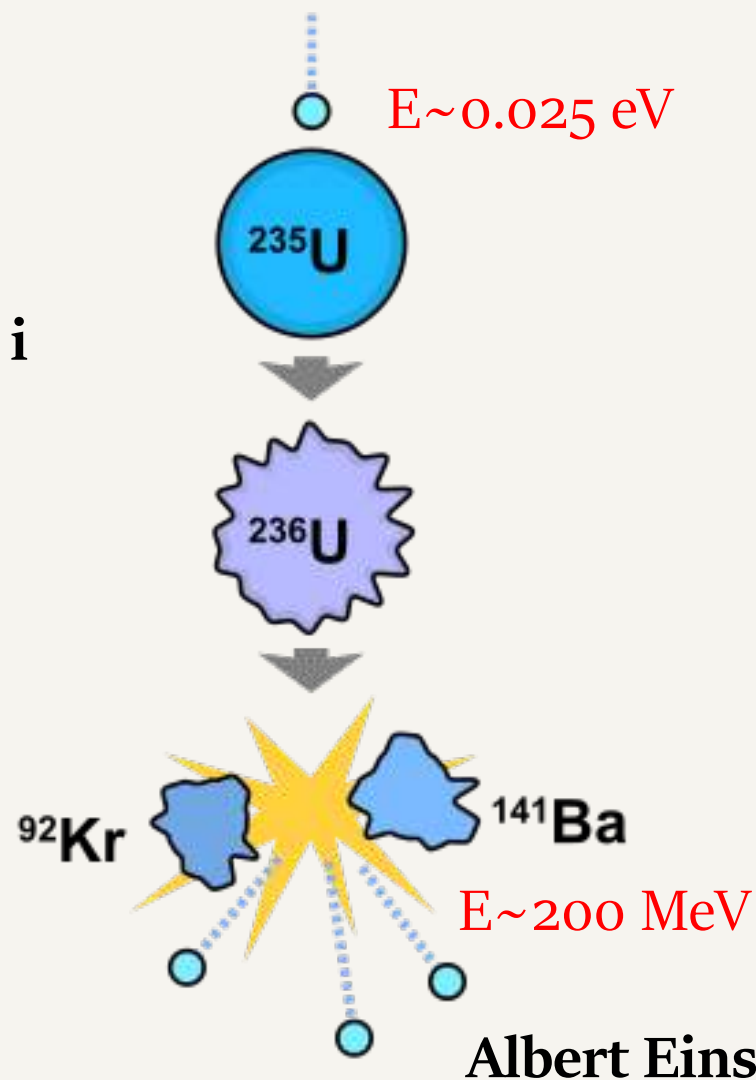


Wyjaśnienie i **SKANDAL**



Credit: Lotte Meitner Graf Archive

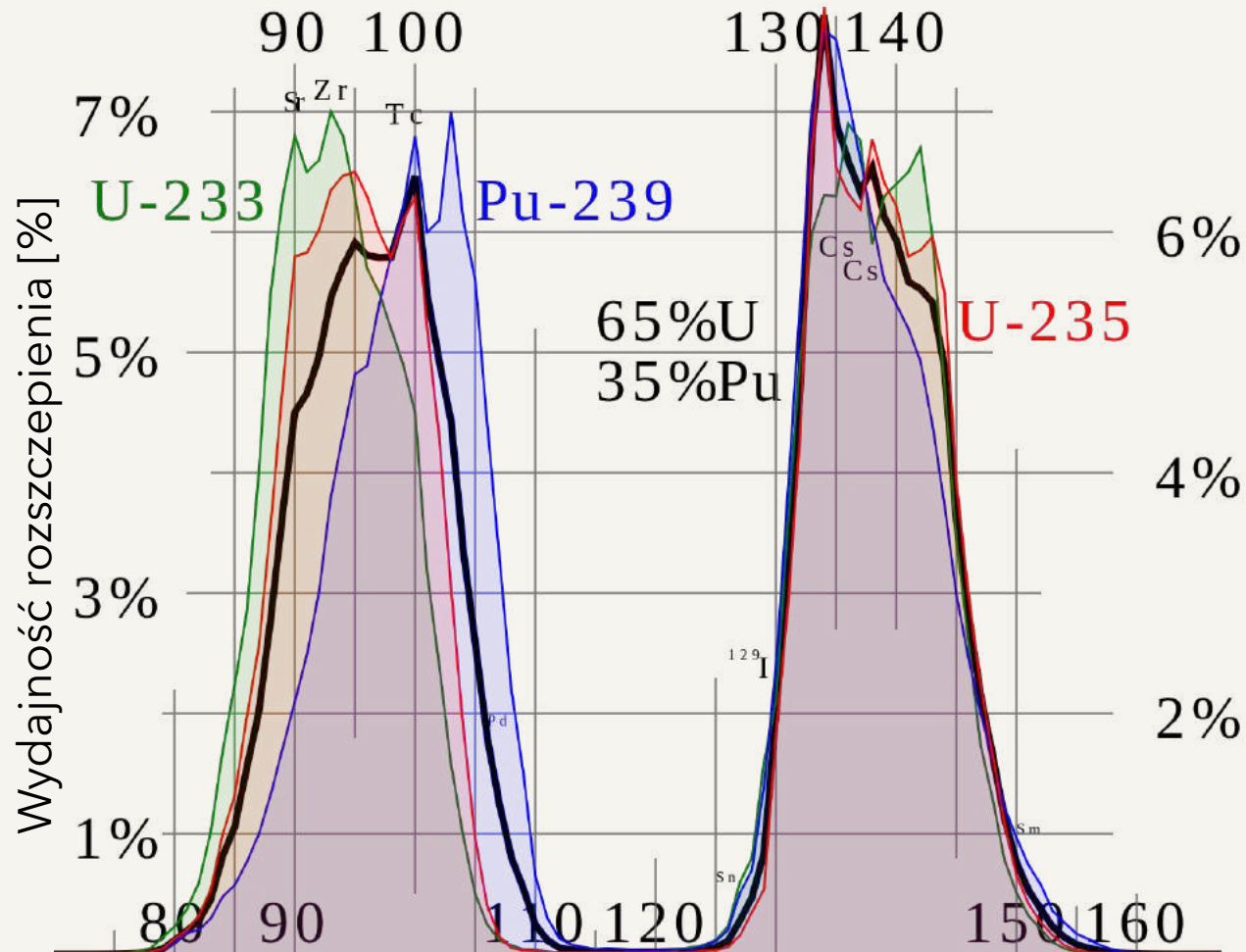
Lise Meitner i
Otto Frish
1939 r.



Nagroda Nobla
1944 r.

tylko dla
Otto Hahna
~~Lise Meitner~~
~~Otto Frish~~
~~Fritz Strassmann~~

Era energii jądrowej – Graal?



Credit: [JWB](#) at en.wikipedia

Otrzymywanie w reakcji większej liczby neutronów niż podczas inicjowania reakcji stwarza możliwość zajścia reakcji łańcuchowej

- ❖ Rozszczepienie 1 jądra ^{235}U
~ 200 MeV
- ❖ Spalenie 1 atomu węgla ($\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$)
~ 4,1 eV (50 mln razy mniej niż z rozszczepienia)

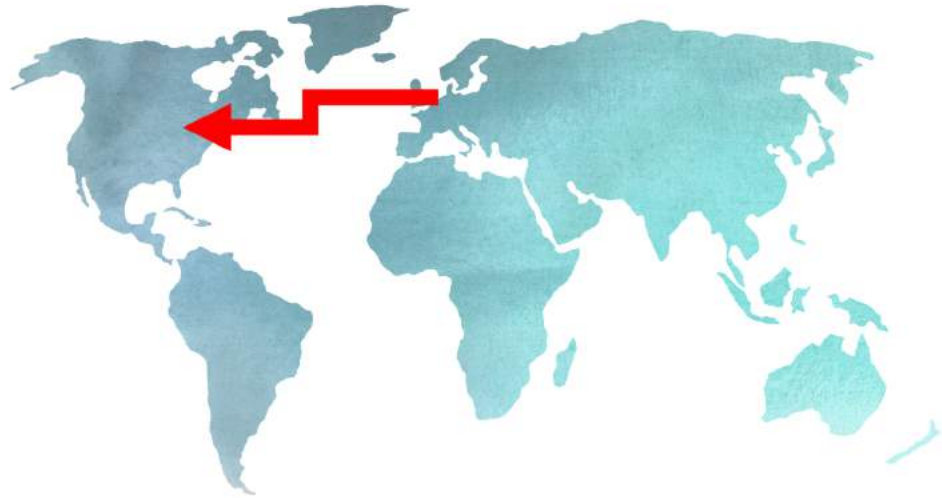
$$E_r(1\text{g } ^{235}\text{U}) = E_s(\sim 2000\text{t węgla}) =$$

$$E_s(\sim 2500\text{ m}^3 \text{ gazu ziemnego}) =$$

$$E_s(\sim 2\text{t ropy naftowej}) = E_s(\sim 4\text{t biomasy})$$

Pierwszy na świecie „stos jądrowy” CP-1 zbudowany przez człowieka ale ...

II wojna światowa



**Enrico Fermi,
Leo Szilard i zespół**

Chicago Pile No 1
- 28 minut, 0,5 W

grudzień 1942 r.

... CP-1 nie pierwszym reaktorem jądrowym na świecie



Credit: Lotte Meitner Graf Archive

OKLO – Gabon (Afryka)

- ❖ odkrycie 1972 r.
- ❖ zubożone złoża uranu (^{235}U - 0,6%)
- ❖ naturalny reaktor jądrowy – 2,4 mld lat temu

Pokojowe wykorzystanie energii jądrowej – energia elektryczna

EBR-1 (1951)
Idaho National Laboratory (USA)



Credit: INL

AM-1 (1954) 5MW
Obińsk (ZSRR)



4 x MAGNOX (1956) 60MW
Calder Hall (GB)

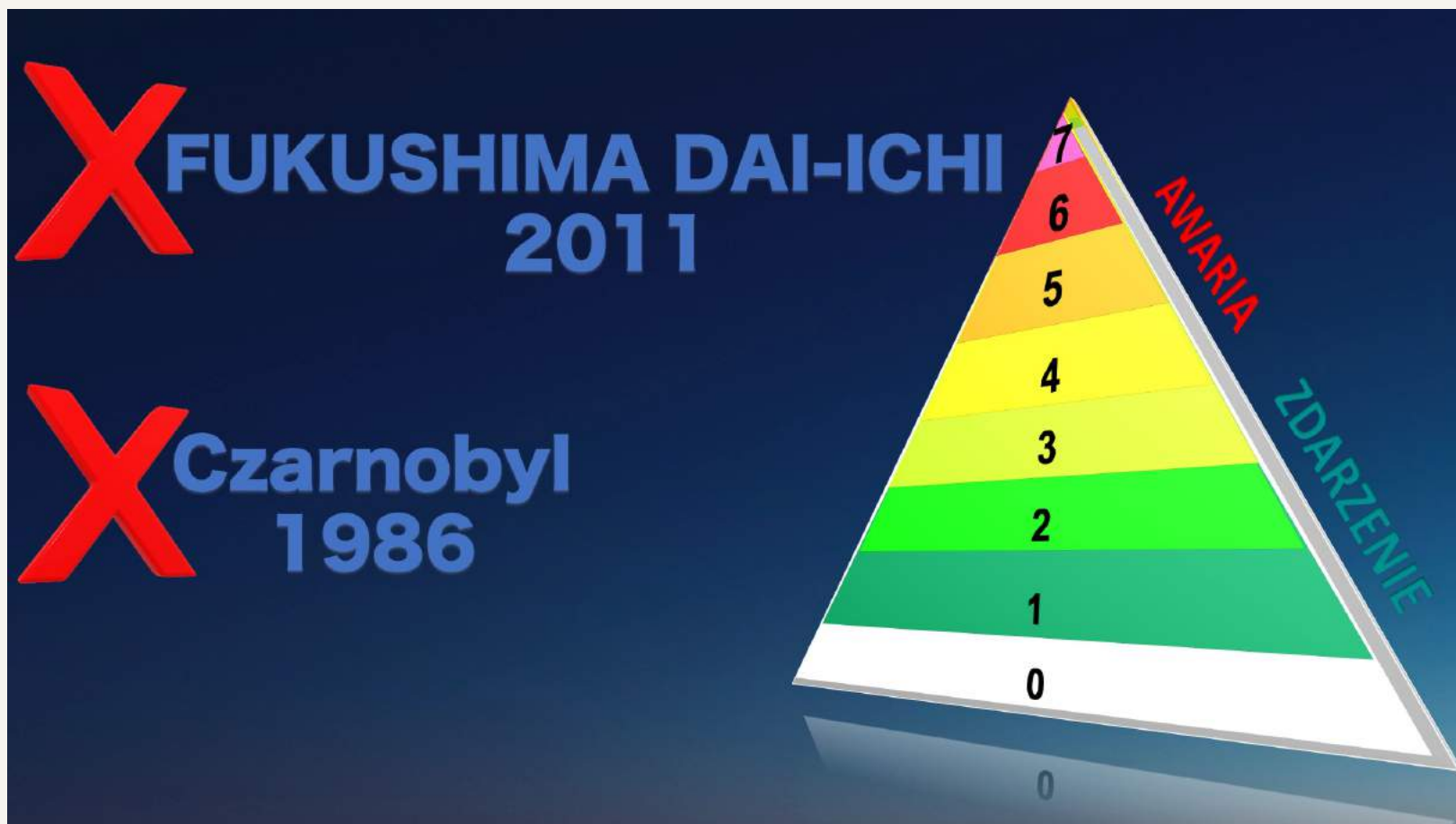


Credit: Britannica

**Czy reaktor jądrowy może eksplodować jak bomba
jądrowa?**

NIE !!!

Zdarzenie jądrowe vs awaria jądrowa



SKALA INES

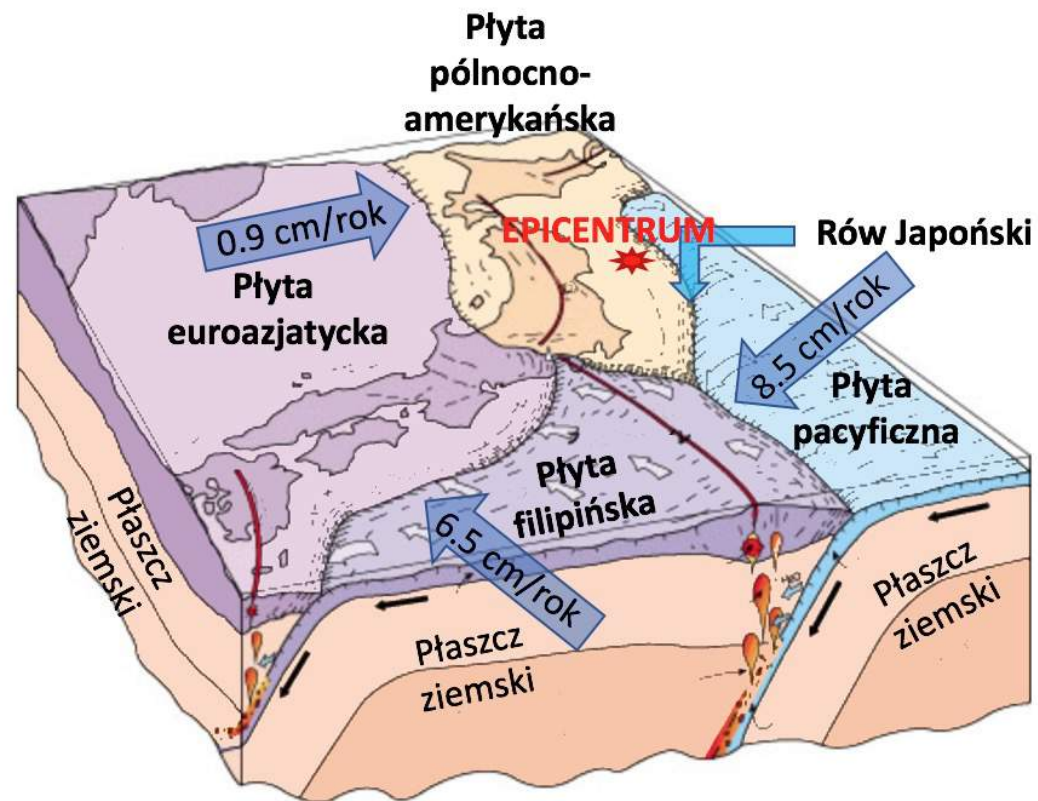
- 7. Wielka awaria
- 6. Poważna awaria
- 5. Awaria z rozległymi skutkami
- 4. Awaria z lokalnymi skutkami
- 3. Poważny incydent
- 2. Incydent
- 1. Anomalia
- 0. Bez znaczenia dla bezpieczeństwa

Trzęsienie ziemi (M 9) i tsunami 2011.03.11

Czas: 14:46 JST

Skala: M 9 w skali
Richtera

Tsunami:
przewidywania 3 – 6 m



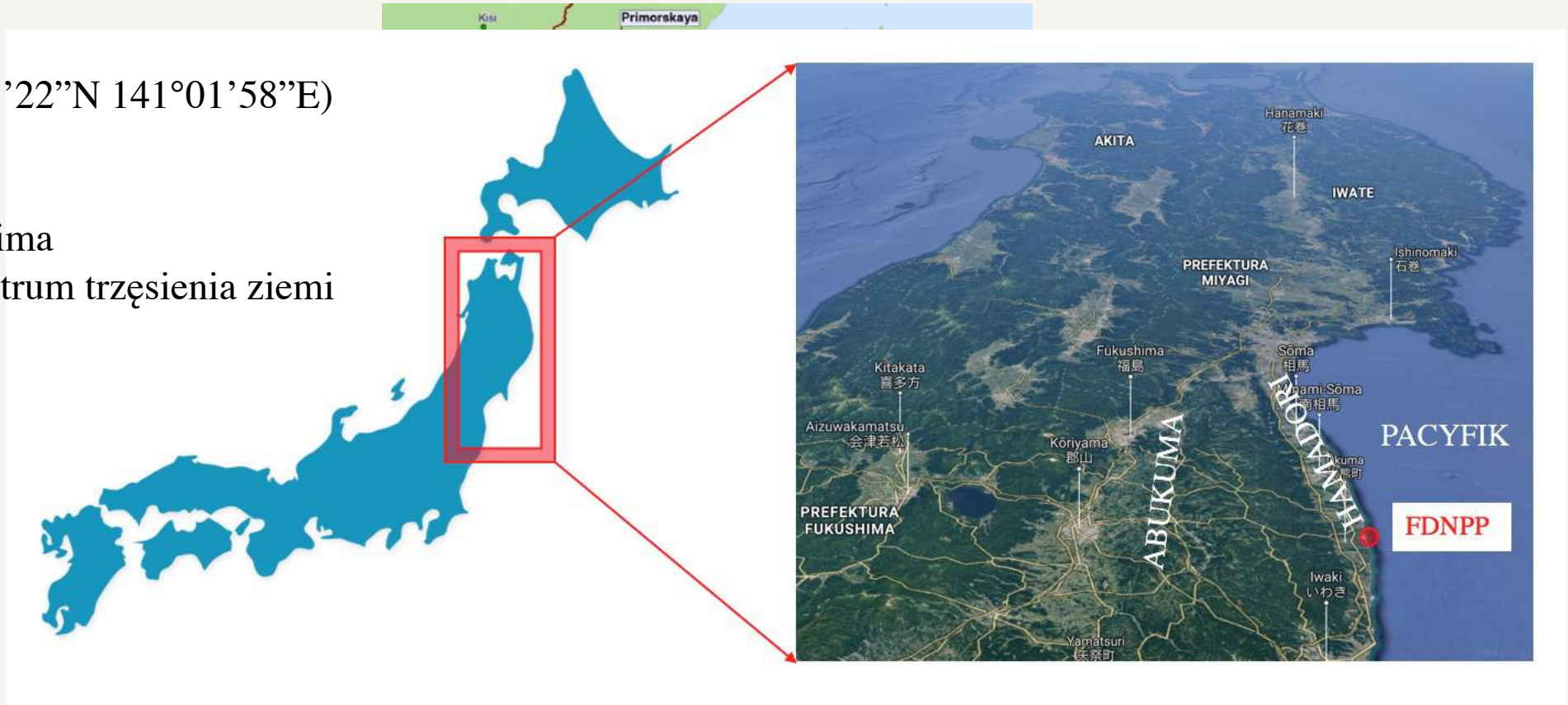
Chile 1960 (M 9.5), Chile 2010 (M 8.8), Alaska 1964 (M 9.2), Sumatra 2004 (M 9.2)

<http://www.dl.ndl.go.jp/>

Elektrownie jądrowe w Japonii

FDNPP (GPS: 37°25'22"N 141°01'58"E)

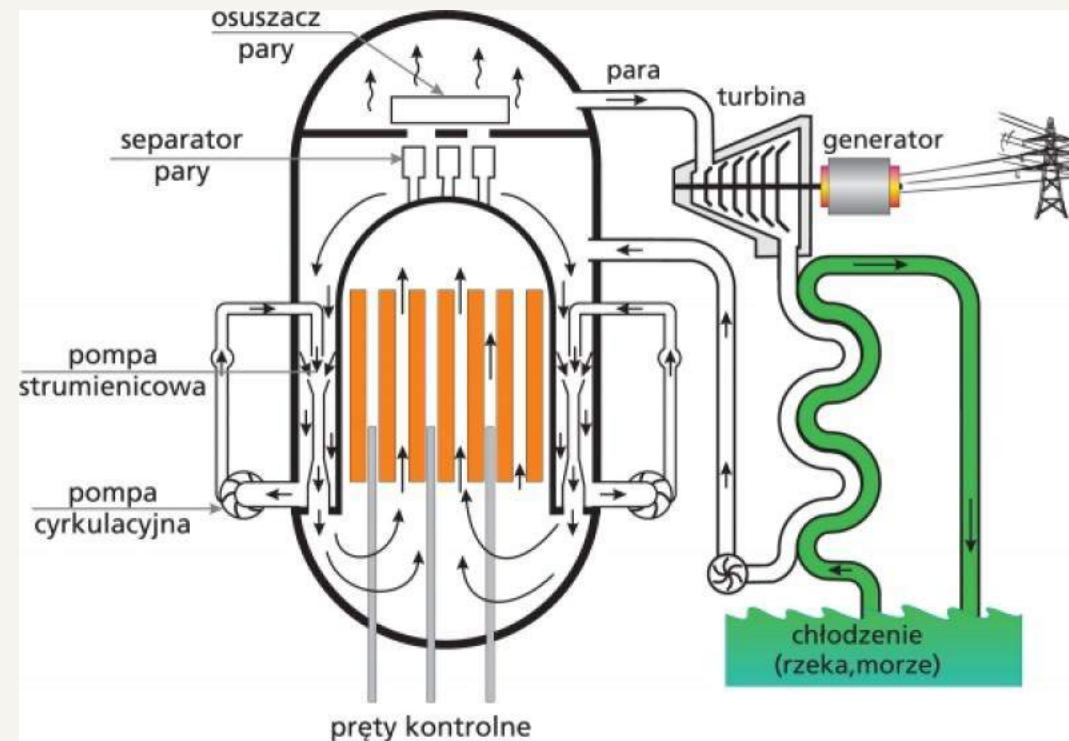
- 220 km od Tokio
- 70 km od Fukushima
- 160 km od epicentrum trzęsienia ziemi



<https://thebulletin.org/>

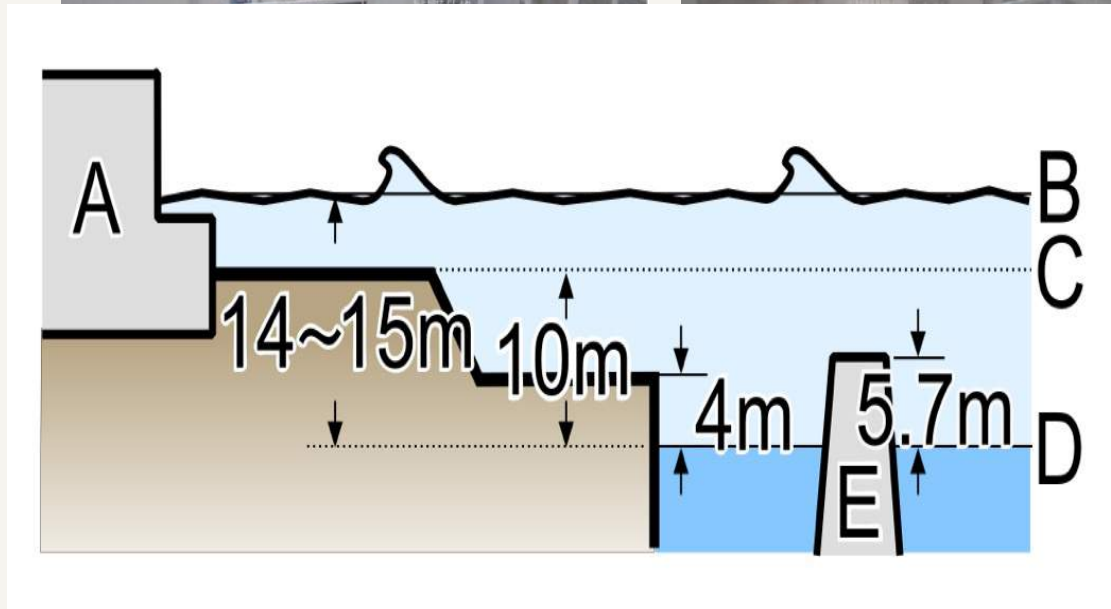
Elektrownia Fukushima Daiichi

Blok	Stan reaktora przed trzęsieniem ziemi	Moc przed awarią (MW(th)/MW(e))	Typ paliwa
1	On	1380 / 460	UOX
2	On	2381 / 784	UOX
3	On	2381 / 784	UOX MOX (5.8% prętów z Pu)
4	Off – 29.11.2010 (pręty paliwowe przeniesione z rdzenia do basenu przechowawczego)	0	UOX
5	Off – 2.01.2011 (pręty paliwowe w rdzeniu)	Ciepło powyłączeniowe	UOX
6	Off – 13.08.2010 (pręty paliwowe w rdzeniu)	Ciepło powyłączeniowe	UOX

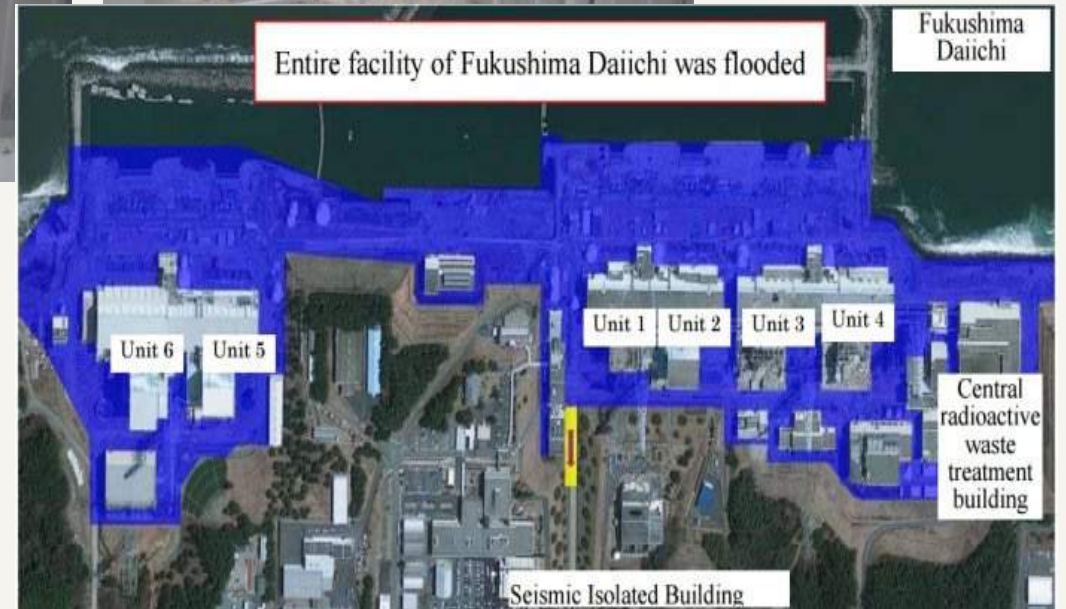


Credit: NCBJ

Chronologia zdarzeń 11 marca 2011 r.

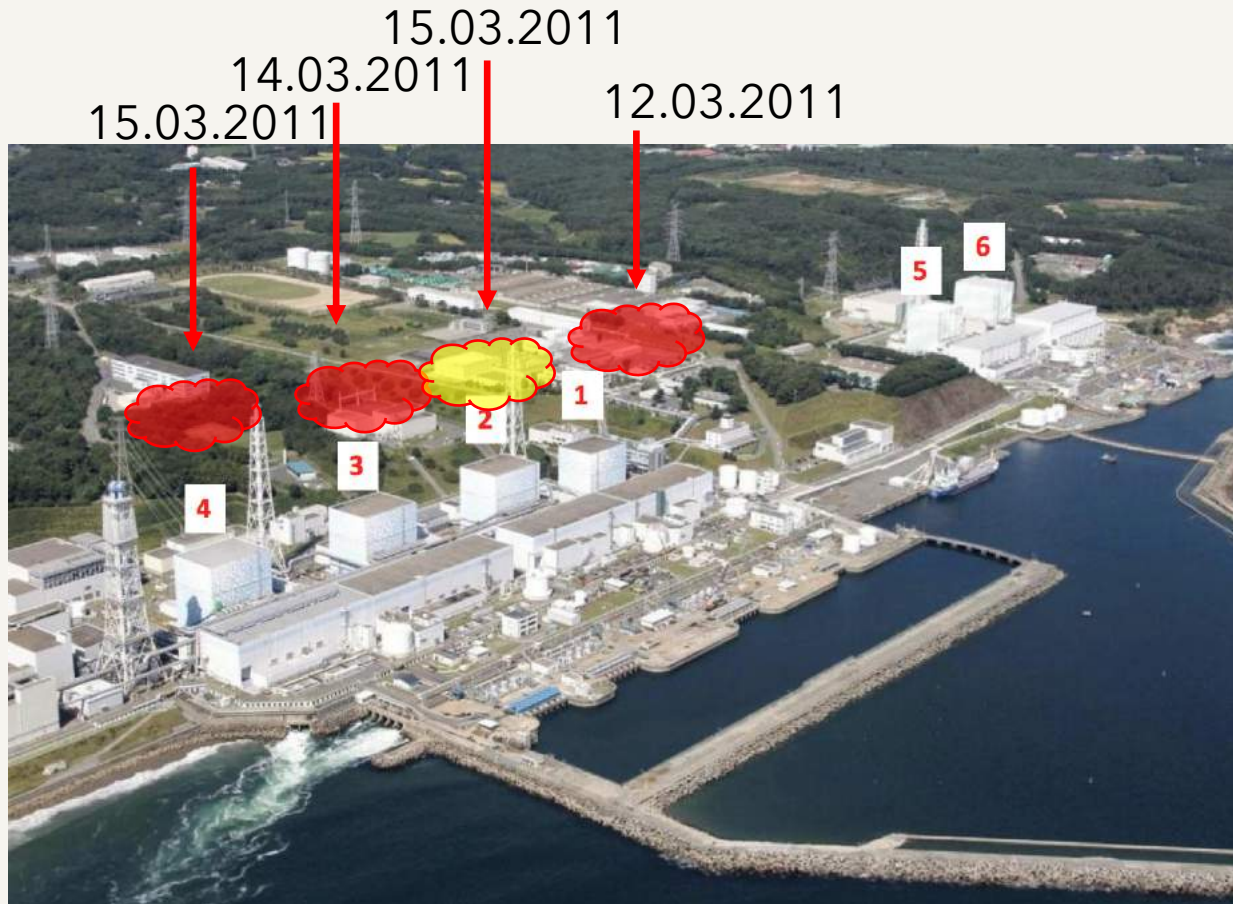


[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fukushima_I_Powerplant_\(Tsunami_height\).png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fukushima_I_Powerplant_(Tsunami_height).png)



<http://photo.tepco.co.jp>

Elektrownia jądrowa Fukushima Daiichi



<http://www.telegraph.co.uk/news/worldnews/asia/japan/8953574/Japan- earthquake- tsunami- and- Fukushima-nuclear-disaster-2011-review.html>

Block nr 2
Block nr 3



Credit: Akio Toba JICC

Awaria FDNPP na skali INES

INES (International Nuclear and Radiological Event Scale)
Japonia -> Nuclear and Industrial Safety Agency (NISA)

18 marca 2011 r. :

blok nr. 1 - 5

blok nr. 2 - 5

blok nr. 3 - 5

blok nr. 4 - 3

12 kwietnia 2011 r.:

FDNPP - 7



Poziom 5 skali INES

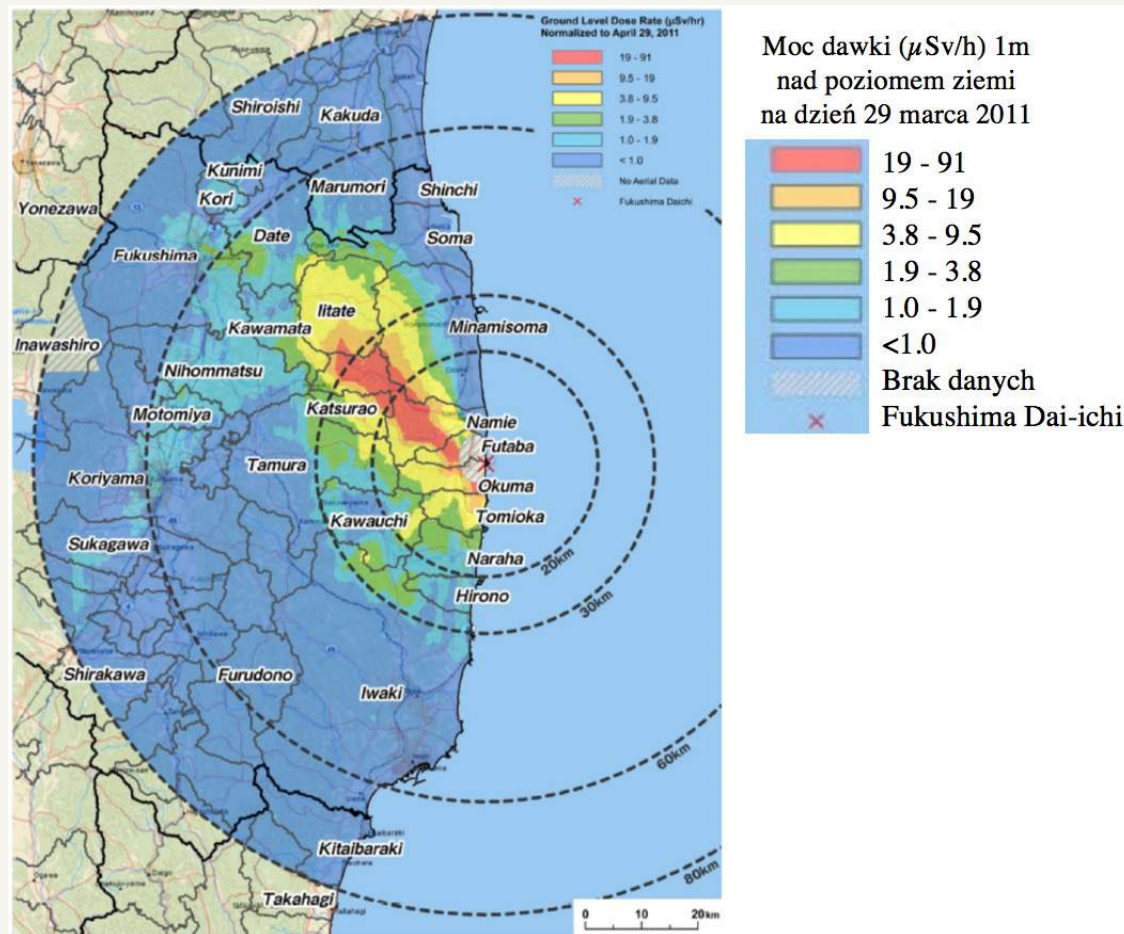
- poważne uszkodzenie rdzenia reaktora,
- uwolnienie materiału radioaktywnego w obiekcie z dużym prawdopodobieństwem narażenia ludności
- ...

Uwolnienia substancji promieniotwórczych z FDNPP na poziomie 10 % uwolnień z Czarnobyla.

Strefa ewakuacji wokół FDNPP

Zarządzenia:

- 11.03.2011 o godz. 20:50
obszar do 2 km od FDNPP
- 11.03.2011 o godz. 21:23
obszar do 3 km od FDNPP
- 12.03.2011 o godz. 5:44
obszar do 10 km
- 12.03.2011 o godz. 18:25
obszar do 20 km



http://radioactivity.nsr.go.jp/en/contents/4000/3180/24/1304797_0506.pdf

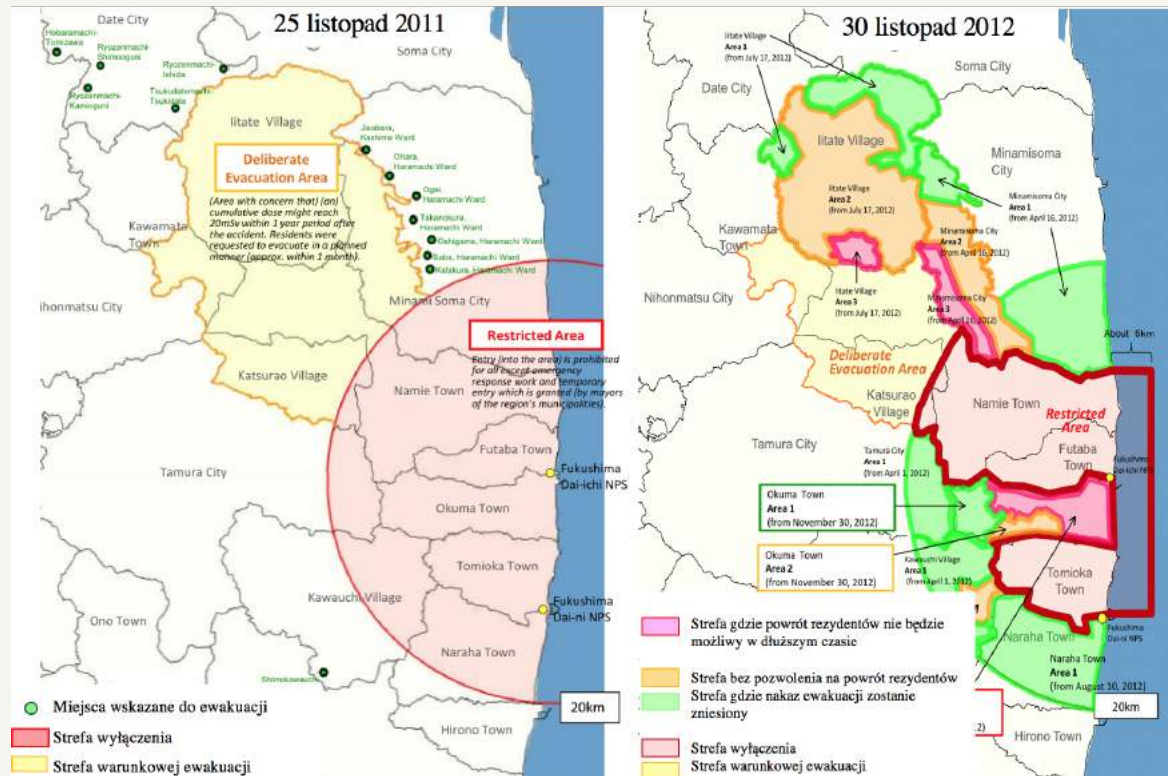
Ekspedycja 6 – 29.04.2011

- 42 loty (2 helikoptery, 1 samolot)
- wysokość 150-700 m nad p.z.
- FDNPP – 60 km USA
60 km – 80 km Japonia

Strefa ewakuacji i wyłączenia wokół FDNPP

26.12.2011 – utworzenie stref:

1. $D < 20 \text{ mSv}$ 2. $20 \text{ mSv} < D < 50 \text{ mSv}$ 3. $D > 50 \text{ mSv}$



http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/roadmap/evacuation_areas.html

Strefa wyłączenia wokół FDNPP

Futaba, ~ 5 km od FDNPP



<http://timelightbox.tumblr.com/post/18846629498/feb-27-2012-namie-japan-police-from-futaba>



Strefa wyłączenia wokół FDNPP

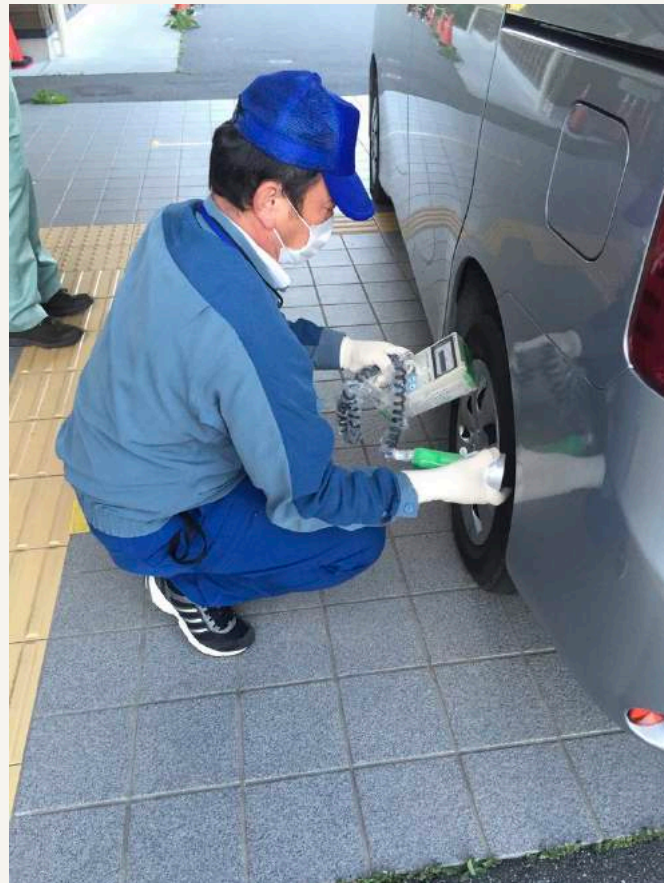
Namie, ~ 20 km od FDNPP



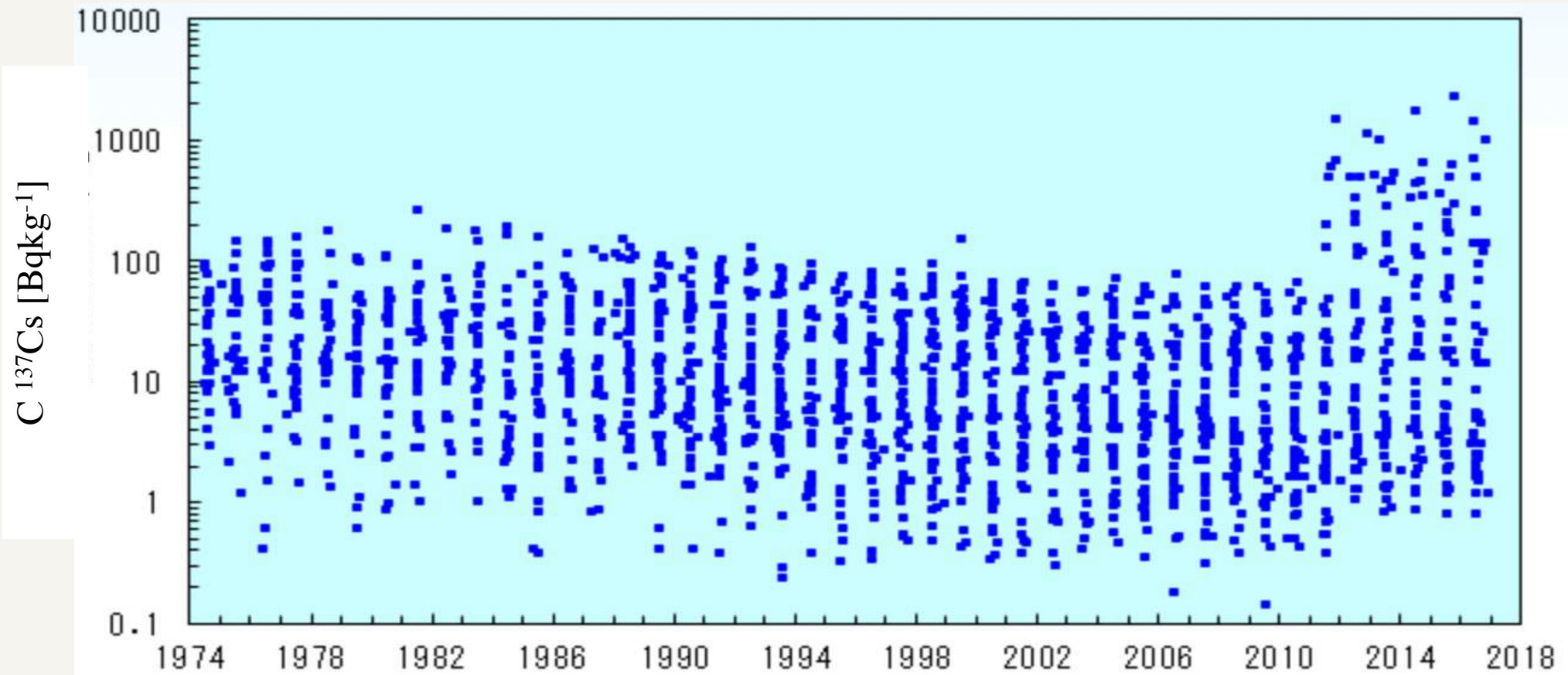
<https://dunrenard.wordpress.com/tag/contaminated-waste/>

Strefa wyłączenia wokół FDNPP

Brama Minami Tsushima ~ 30 km od FDNPP

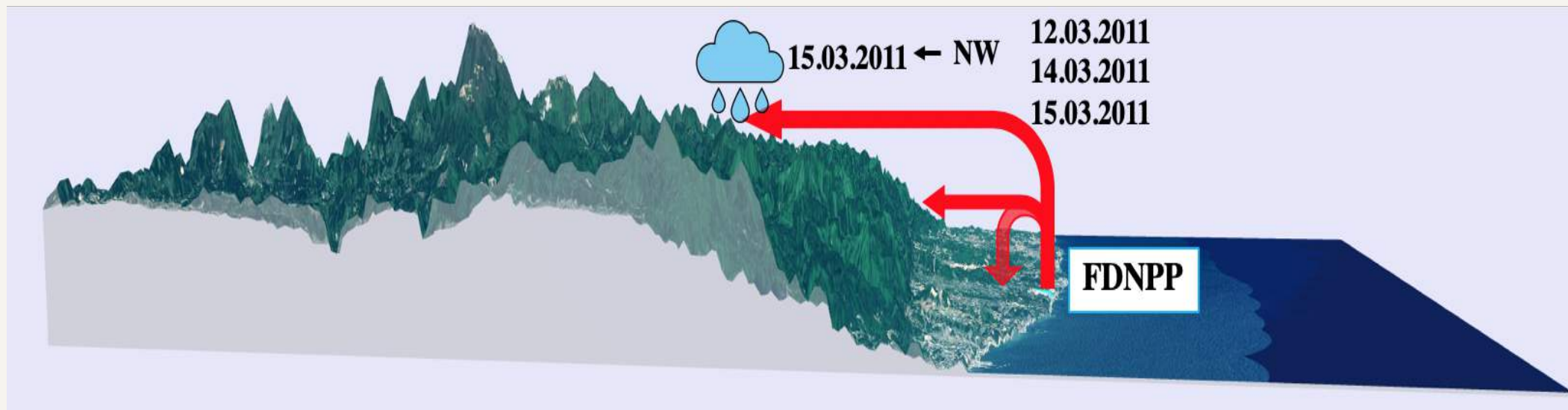


Sygnatury FDNPP w środowisku



<http://www.kankyo-hoshano.gov.jp>

„Hot-spoty”

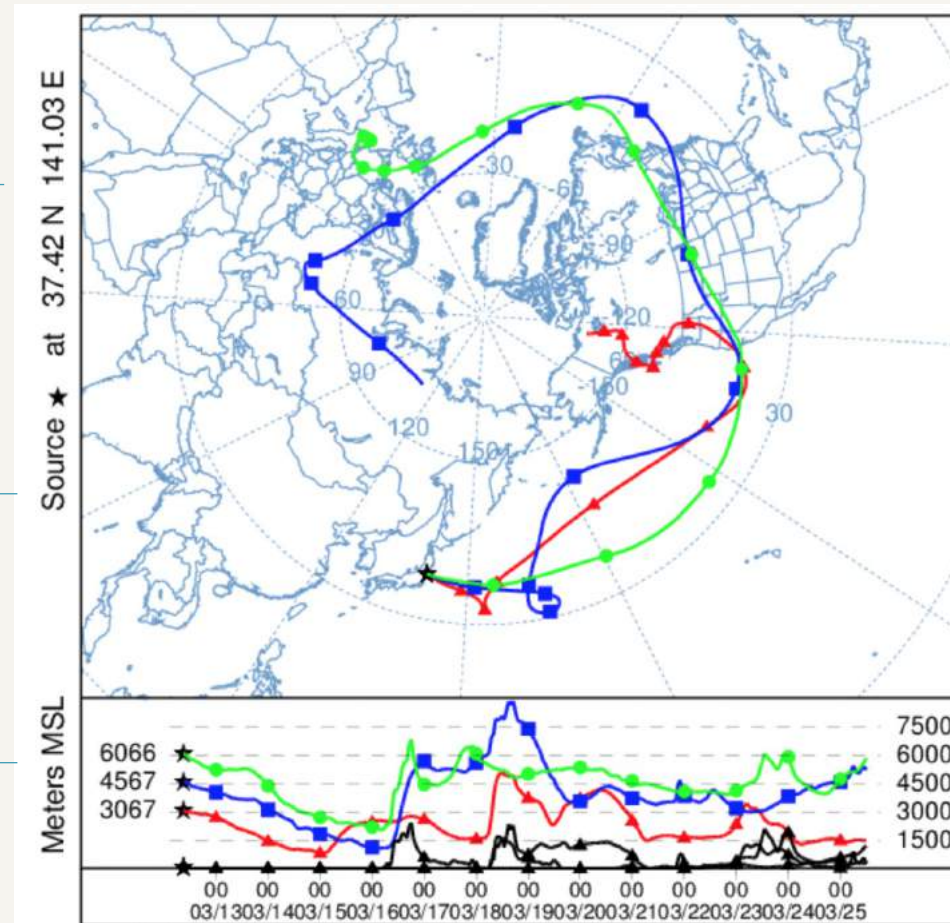


Kiedy w Europie zarejestrowaliśmy ślady awarii FDNPP?

Transport aerozoli
pomiędzy 13 –
25.03.2011

Trajektoria: północny
Pacyfik, północna część
USA, północny Atlantyk,
Islandia, Skandynawia

Model: HYSPLIT



Pierwsze ślady zdarzenia
powinny być wykrywalne
nad Europą
ok. 20 – 21.03.2011

Ile ^{131}I dotarło nad Europę?

Pomiary ^{131}I w troposferze (Niemcy, Szwajcaria) – kilka mBq m^{-3}

Założenie:

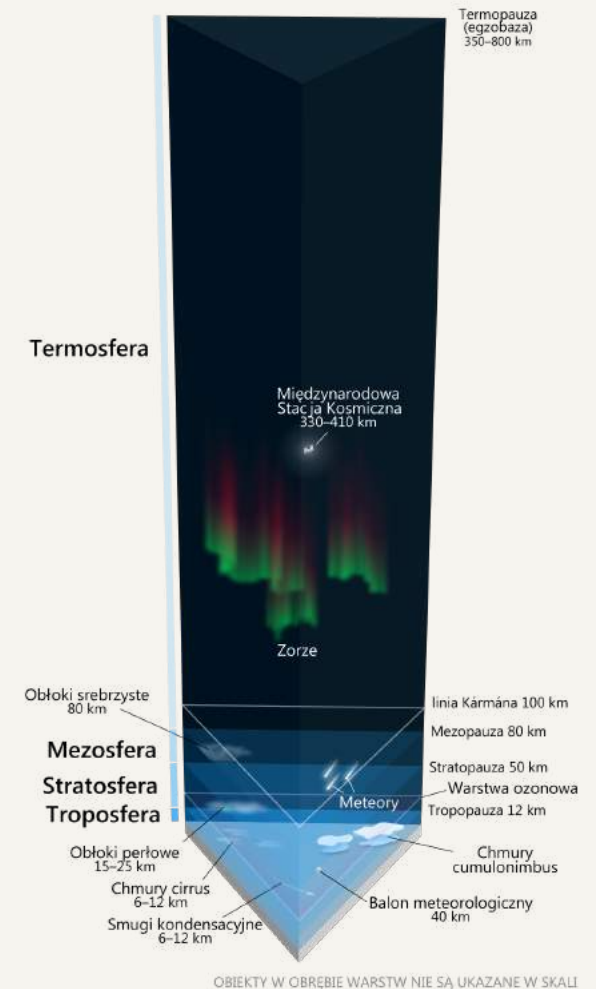
- Stężenie aktywności ^{131}I stałe do wysokości 5.5 km do 10 dni
- Szybkość przemieszczania się mas powietrza 50 km h^{-1}
- Długość przemieszczenia 3000 km

Wynik:

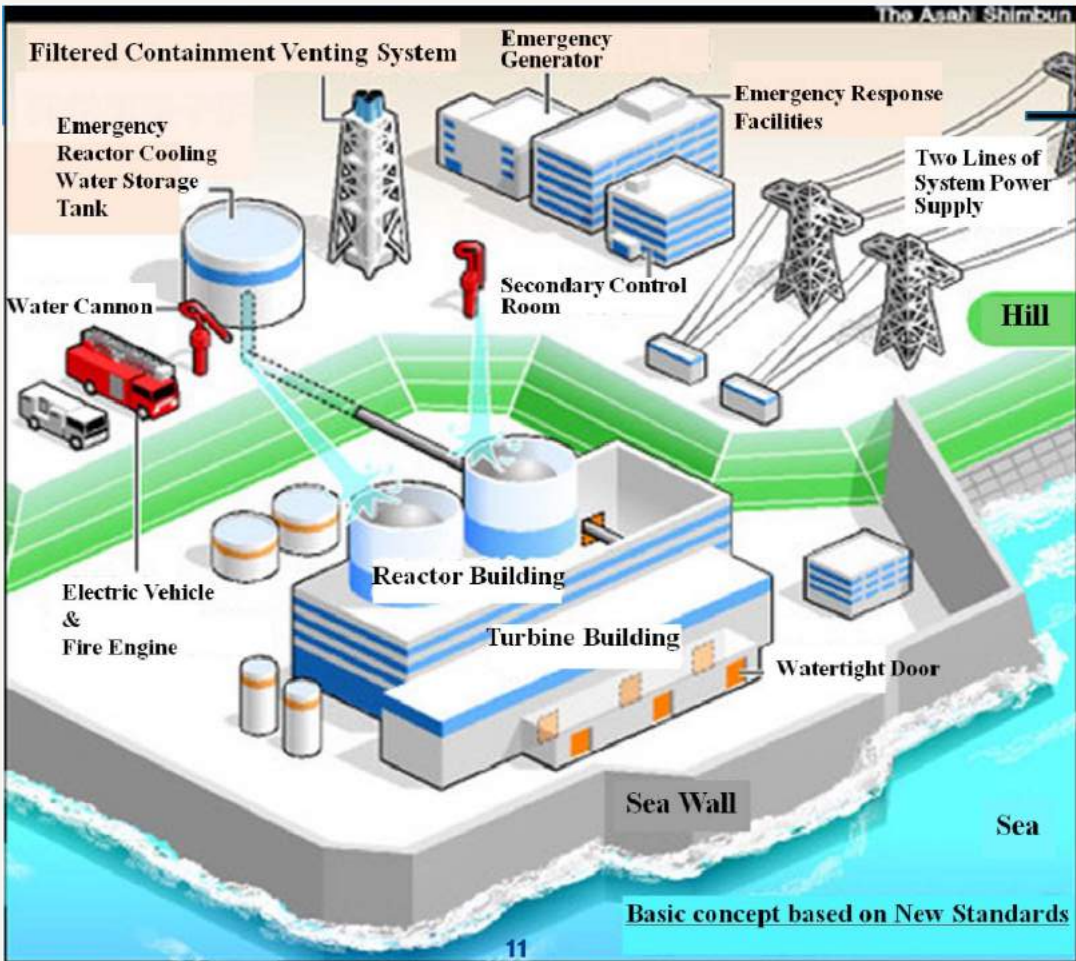
$$A \text{ } ^{131}\text{I} = 1\text{PBq}$$

Czyli:

1 % wielkości uwolnionej do atmosfery z FDNPP



Lekcja, którą powinniśmy wyciągnąć z awarii EJ FDNPP



- pasywne systemy bezpieczeństwa w reaktorach tj. takie, które zadziałają pomimo uszkodzenia źródeł zasilania energii,
- systemy, które mają przeciwdziałać uszkodzeniu lub zalaniu awaryjnych źródeł zasilania,
- sposoby oczyszczania wody i środowiska z substancji promieniotwórczych (zwłaszcza trytu)

EJ Czarnobyl

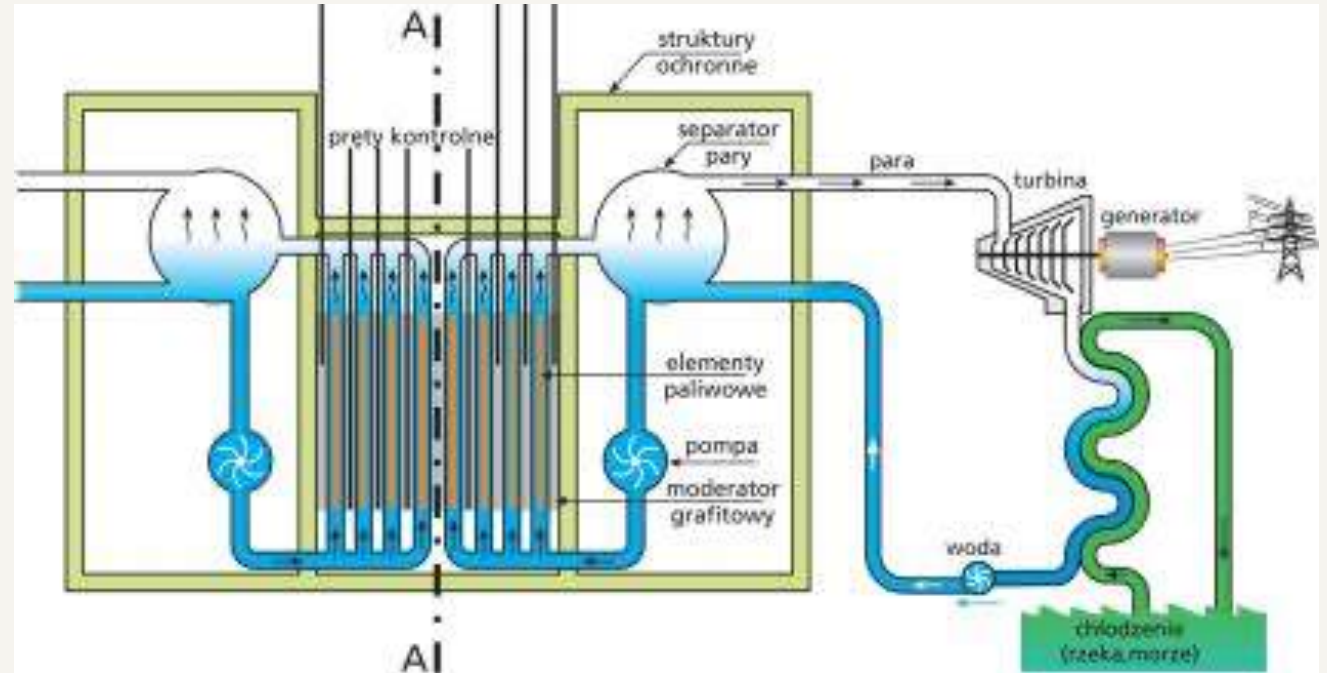
EJ Czarnobyl (51,38955N, 30,09915E)

- 4 km od miasta Prypeć
- 18 km od Czarnobyla
- 110 km od Kijowa

W skład elektrowni wchodziły:

- 4 reaktory RBMK (lata 70 i 80)
- 2 kolejne nie zostały uruchomione

Lekkowodny reaktor kanałowy RBMK z wrzącą wodą i moderatorem grafitowym



Credit: NCBJ

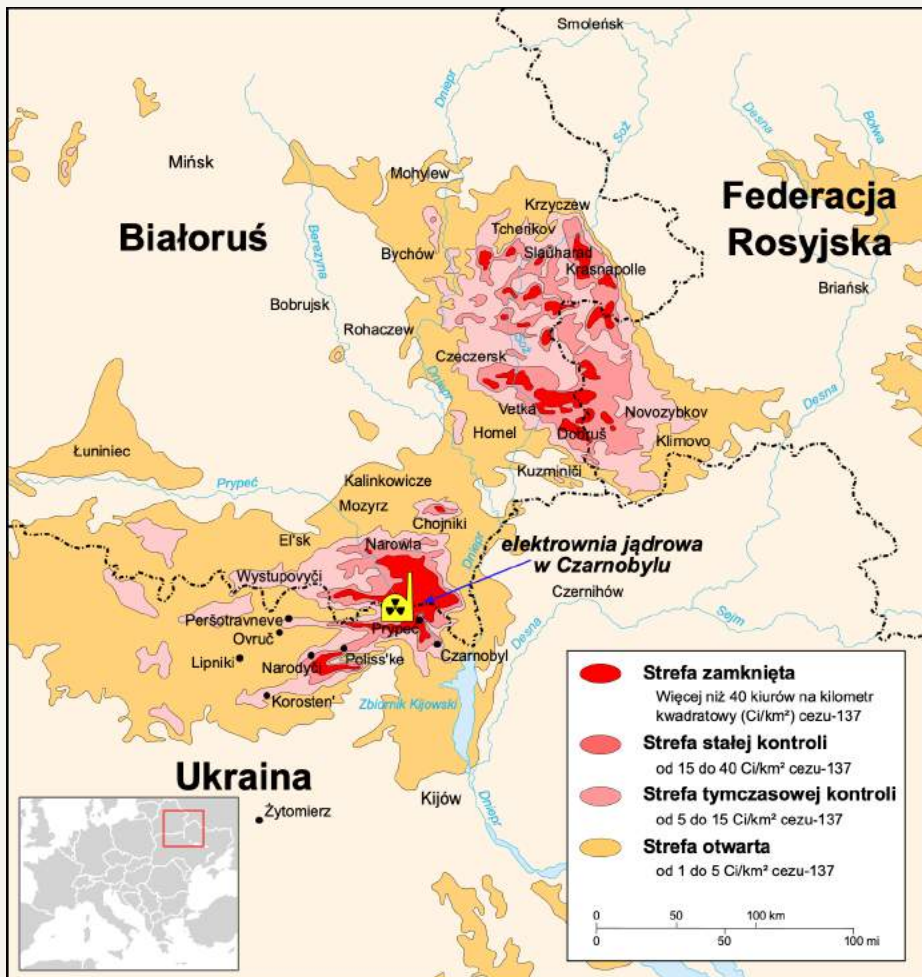
Tragiczny eksperyment – 26 kwietnia 1986 r.



Credit: Wojtek Laski

- Eksperyment z awaryjnym zasilaniem urządzeń bloku 4 z generatora zasilającego pompy cyrk. obiegu pierwotnego
- Zmniejszenie szybkości przepływu wody przez kanały paliwowe
- Wzrost temperatury i mocy reaktora
- Stopienie paliwa jądrowego
- Dwa wybuchy chemiczne (odrzucenie pokrywy betonowej)
- Samozapłon moderatora i pożar (10 dni – 5000°C)
- Uwolnienie izotopów promieniotwórczych

Strefa wyłączenia wokół EJ Czarnobyl



Chernobyl_radiation_map_1996.svg: CIA Factbook, Sting (vectorisation), MTruch (English Translation)

derivative work: Vearthy, CC BY-SA 2.5

Zapytaj Fizyka Uniwersytet Warszawski 2021.07.01

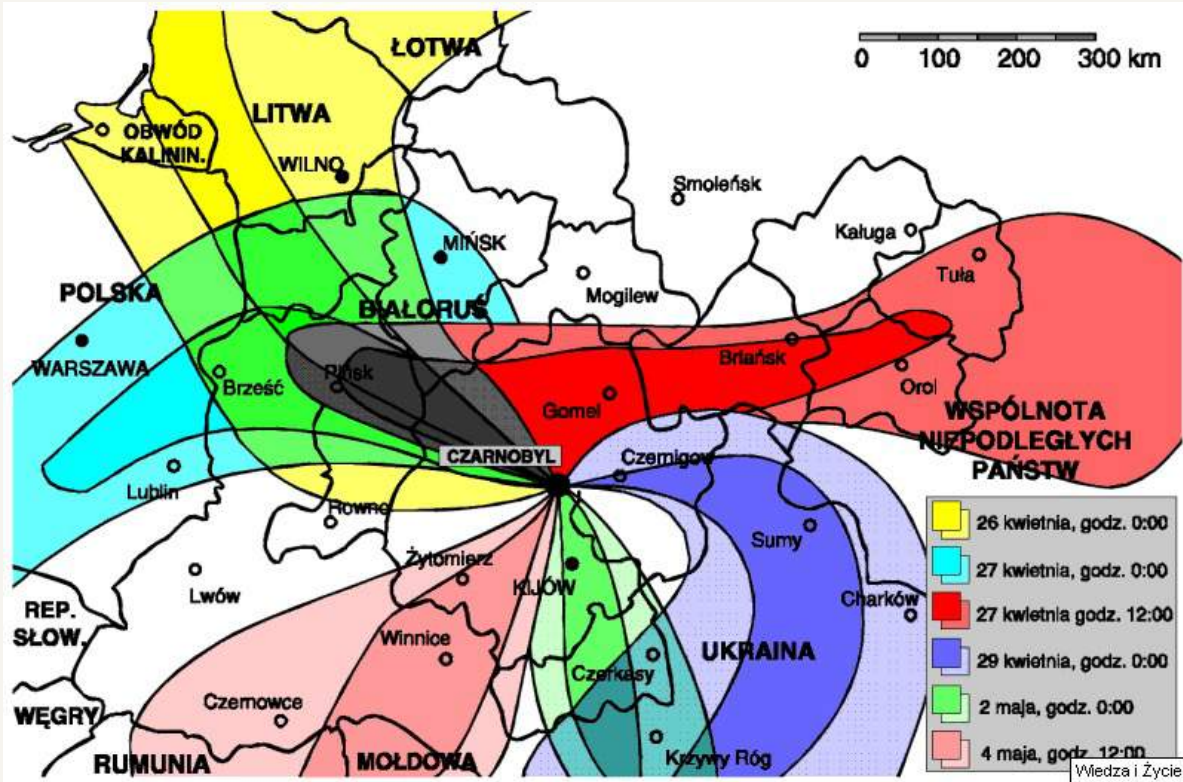
Ewakuacja:

- 27 kwietnia 1986 r
- strefa ewakuacji: 30 km od EJ Czarnobyl
- kryterium: 350 mSv na całe życie
- do 7 maja ewakuowano łącznie 116 tys. ludzi, 60 tys. zwierząt domowych i gospodarskich

Ofiary:

- 3 osoby na wskutek pożaru i wybuchów
- 28 strażaków w ciągu trzech miesięcy od wypadku (choroba popromienna 4-16 Sv)
- w ciągu kolejnych 10 lat 14 dalszych osób
- 134 osoby z ostrą chorobą popromienną

Dyspersja uwolnionych izotopów promieniotwórczych w atmosferze

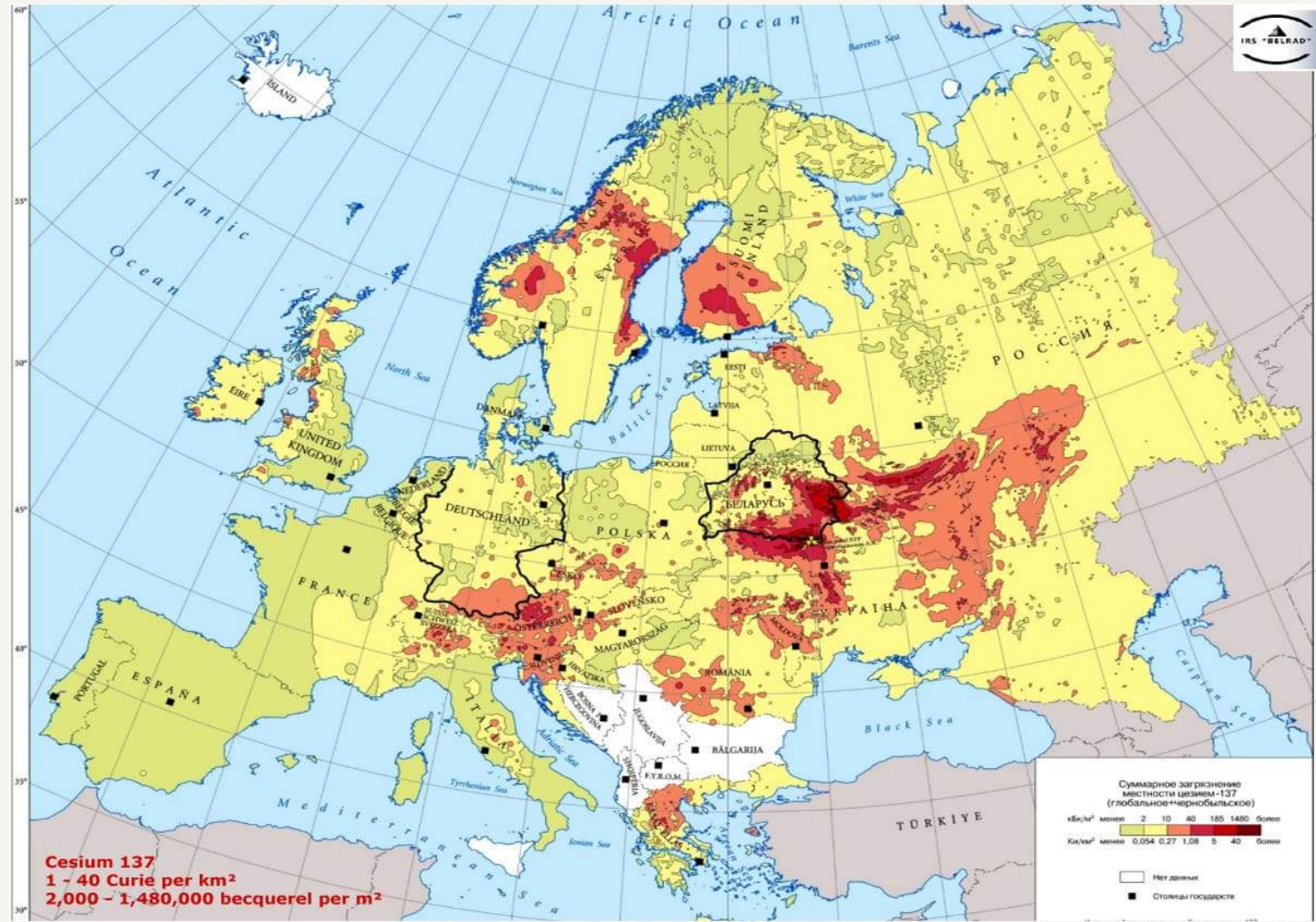


Przyjmuje się, że :

- 40% uwolnionych substancji promieniotwórczych zostało zdeponowanych na terenach byłego ZSRR (Ukraina, Białoruś)
- reszta na terenie Europy i półkuli północnej

Credit: Zbigniew Jaworowski

Depozycja substancji promieniotwórczych (^{137}Cs)



<https://i.imgur.com/zIRGSs3.jpg>

Zapytaj Fizyka Uniwersytet Warszawski 2021.07.01

Zabezpieczenie miejsca awarii



Credit: Germán Orizaola

Plan działania:

- ugaszenie pożaru (piasek, dolomit, węglík boru, ołów)
- zabezpieczenie terenu pod reaktorem
- budowa 1. sarkofagu (listopad 1986 r.)
- budowa 2. sarkofagu (lipiec 2019 r.)

Wielka awaria EJ FD (2011) vs EJ Czarnobyl (1986)



EJ FD (2011)

- Trzęsienie ziemi + tsunami – przyczyny naturalne
- Uszkodzenie sieci elektroenergetycznej
- Wzrost temperatury i ciśnienia
- Stopienie rdzeni
- Uszkodzenie obudowy bezpieczeństwa

EJ Czarnobyl (1986)

- Eksperyment z awaryjnym zasilaniem
Wzrost temp. i mocy reaktora
- Uszkodzenie obudowy bezpieczeństwa
- Samozapłon moderatora i pożar

Wielka awaria EJ FD (2011) vs EJ Czarnobyl (1986)



EJ FD (2011)

^{131}I 0,16 EBq

^{137}Cs 15,3 PBq

^{134}Cs 17,5 PBq

^{238}Pu 18,8 GBq

} 10% uwolnienia z Czarnobyla

EJ Czarnobyl (1986)

^{131}I 1,8 EBq

^{137}Cs 85,0 PBq

^{134}Cs 0,19 EBq

^{238}Pu 35,0 TBq

Wielka awaria EJ FD (2011) vs EJ Czarnobyl (1986)



EJ FD (2011)

~ 10 000 km

Kraków

^{131}I ~5 mBqm⁻³

^{137}Cs ~0,4 mBqm⁻³

^{134}Cs ~0,4 mBqm⁻³

EJ Czarnobyl (1986)

~ 800 km

Mikołajki

^{131}I ~10 Bqm⁻³

^{137}Cs ~ 5 Bqm⁻³

^{134}Cs ~2 Bqm⁻³

~1000 x mniej niż w
Czasie awarii w Czarnobylu

Wielka awaria EJ FD (2011) vs EJ Czarnobyl (1986)



EJ FD (2011)

POMIJALNE

EJ Czarnobyl (1986)

- Podlasie
- Opolszczyzna

**Dlaczego trudno jest mówić w Polsce o tematach
takich jak promieniotwórczość czy awaria
elektrowni jądrowej?**