

**Politechnika
Warszawska**

Analiza sytuacji energetyki jądrowej w obliczu katastrofy w Fukushima na przykładzie Francji

Jakub Kopyciński
Student Wydziału Fizyki PW

Warszawa, 2018

Opracowanie zaliczeniowe z przedmiotu Metody i Techniki Jądrowe
pod kierunkiem prof. J. Pluty



Analiza sytuacji energetyki jądrowej w obliczu katastrofy w Fukushima na przykładzie Francji

Spis treści

1. Slajd tytułowy
- 2.-3. Spis treści
4. Bezpieczeństwo jądrowe – organa we Francji
- 5.-6. Przed Fukushima – Three Mile Island
- 7.-9. Przed Fukushima – Czarnobyl
10. Katastrofa w Fukushima – przebieg
11. Katastrofa w Fukushima – awaria
- 12.-14. Patrząc w oczy Fukushima
15. Sześć wyzwań, które stawia katastrofa w Fukushima
- 16.-22. Ocena ryzyka katastrofy naturalnej
- 23.-26. Zapewnienie możliwości schłodzenia reaktora
- 27.-30. Zapewnienie szczelności obudowy reaktora
- 31.-34. Kontrola topnienia rdzenia
- 35.-38. Organizacja pomocy
39. Zarządzanie strefą skażenia



Analiza sytuacji energetyki jądrowej w obliczu katastrofy w Fukushima na przykładzie Francji

Spis treści cz. 2

- 40.-45. Reakcje państw bezpośrednio po katastrofie
- 46. Reakcje we Francji po katastrofie – rząd
- 47. Reakcje we Francji po katastrofie – rząd i EDF
- 48. Reakcje we Francji po katastrofie – Zgromadzenie Narodowe
- 49. Reakcje we Francji po katastrofie - społeczeństwo
- 50. Podsumowanie
- 51. Literatura



Bezpieczeństwo jądrowe – organa we Francji



Agencja
Bezpieczeństwa
Nuklearnego



Instytut Ochrony
przed
Promieniowaniem
i Bezpieczeństwa
Nuklearnego

Departament
Bezpieczeństwa
Nuklearnego



Pluton Ochrony
Specjalnej
Żandarmeria
Narodowa



Politechnika
Warszawska



Przed Fukushima - Three Mile Island (28.03.1979 r.)

Wypadek był uważany za niemożliwy¹

Mickaël Dubreuil

*szef biura analiz Instytutu Ochrony przed Promieniowaniem
i Bezpieczeństwa Nuklearnego*

Po katastrofie na Three Mile Island, uznawanej w swoim czasie za najpoważniejszą awarię w energetyce jądrowej, a spowodowanej częściowym stopieniem rdzenia reaktora, operator elektrowni jądrowych we Francji, Électricite de France, określił nowe reguły użytkowania reaktorów, w tym także na wypadek ciężkich katastrof, których prawdopodobieństwo przed tą tragedią uznawane było za zerowe.



Przed Fukushima - Three Mile Island cz. 2.



Tam, gdzie Amerykanie musieli podejmować działania improwizowane, Francuzi, nauczeni na ich błędach, wprowadzili procedury dotyczące zarządzania kryzysowego.

Inżynierowie, nawet w późnych latach 70-tych XX w. całkowicie wykluczali ideę stopienia rdzenia w reaktorze typu PWR. Aż do momentu potwierdzenia, że w reaktorze TMI-2 do takiego zjawiska doszło.

Rys. 6.1 Fotografia wykonana po katastrofie w elektrowni Three Mile Island. Źródło: [1].



Przed Fukushima – Czarnobyl (26.04.1986 r.)

Katastrofa w Stanach utwierdziła niektórych w mylnym skądinąd przekonaniu, że procedury zapewniły w całości bezpieczeństwo populacji. Wynikało to z tego, że najgorszego udało się uniknąć, ponieważ nie doszło do znacznego narażenia ludzi na promieniowanie jonizujące. Po tym nagłym wstrząsie, jakim była katastrofa czarnobylska, we Francji zarządzono próbne ewakuacje ludności cywilnej w otoczeniu reaktorów.

Takie ewakuacje od czasów katastrofy w Czarnobylu odbywają się regularnie.



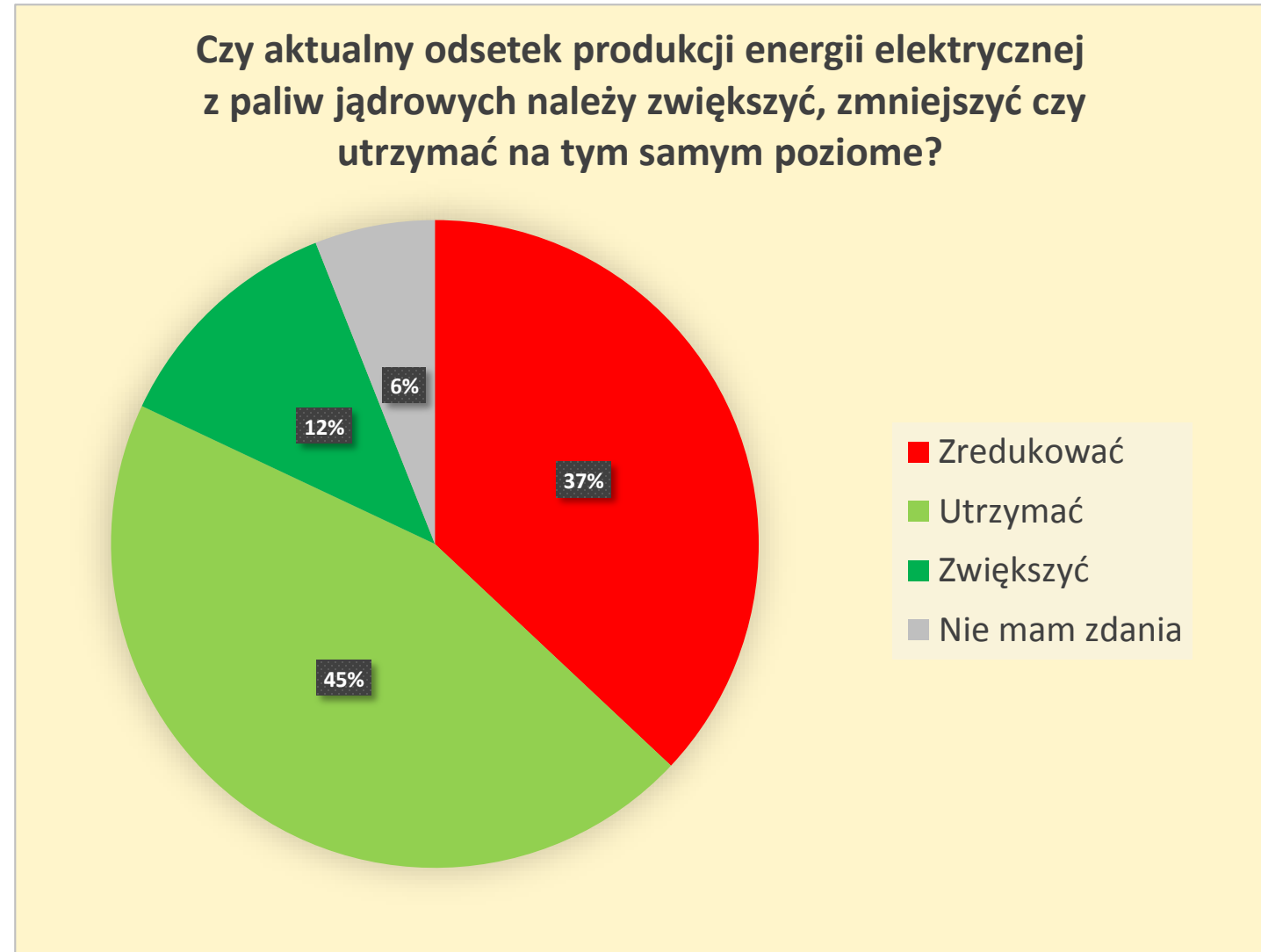
Rys. 7.1 Ćwiczenia ewakuacyjne – elektrownia jądrowa w Gravelines, 18 stycznia 2011 r. Źródło: [1].

Przed Fukushima – Czarnobyl cz. 2.

Dane z raportu Komisji Europejskiej pokazywały, że na około rok przed katastrofą w Fukushimie, a 23 lata po tej w Czarnobylu, większość Francuzów była pozytywnie nastawiona do utrzymania lub zwiększenia wkładu energetyki jądrowej w produkcję energii elektrycznej.

Rys. 8.1 Raport Komisji Europejskiej „Europejczycy i bezpieczeństwo nuklearne” z 2010 r - Francja.

Źródło danych: [3]



Przed Fukushima – Czarnobyl cz. 3.



Francuski Instytut Ochrony przed Promieniowaniem i Bezpieczeństwa Nuklearnego zaangażował się w analizę danych dot. skutków małych dawek przyjętych przez ofiary Czarnobyla. Bada się wpływ promieniowania na zwierzęta, odkładanie w łańcuchu pokarmowym radionuklidów, jak również badania dzieci związane z prewencją raka tarczycy.

Także Agencja Bezpieczeństwa Nuklearnego silnie zajmuje się tematyką czarnobylską. Opublikowano ostatnio całościowy, prawie stustronicowy przewodnik metodologiczny skupiający się na zarządzaniu terenami potencjalnie skażonymi pt. „Guide méthodologique - Gestion des sites potentiellement pollués par des substances radioactives” na podstawie danych zgromadzonych w Czarnobylu właśnie¹.

Katastrofa w Fukushima - przebieg

Jak każdy, my też zaniemówiliśmy w obliczu tego niewyobrażalnego następstwa katastrof, widząc kolejno trzęsienie ziemi, tsunami i, ostatecznie, tak poważny wypadek jądrowy.¹

redakcja czasopisma Science&Vie

Sejsmiczne monstrum o magnitudzie 9 stopni w skali Richtera [1] nawiedziło Japonię w dniu 11 marca 2011 roku. Był to najsilniejszy wstrząs sejsmiczny, jaki kiedykolwiek nawiedził ten kraj. W jego konsekwencji do wybrzeża dotarły fale tsunami, które osiągnęły wysokość niemal 10 metrów [1]. Mimo że konstrukcja elektrowni Fukushima Daiichi była przygotowana na wypadek katastrof naturalnych, doszło do poważnej awarii elektrowni, z całą pewnością najpoważniejszej od katastrofy czarnobylskiej.

1. "Comme chacun, nous sommes restés bouches bées devant cet incroyable enchaînement de catastrophes voyant se succéder séisme, tsunami et, finalement, l'accident nucléaire d'une extrême gravité", za: [2]

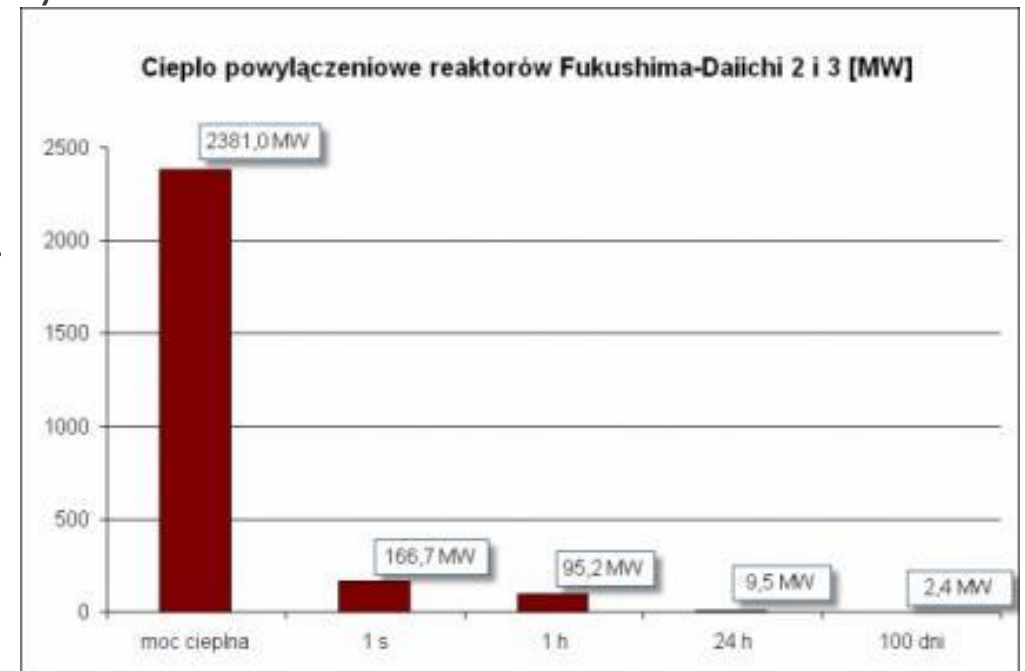


Katastrofa w Fukushima – awaria elektrowni



Po nadejściu trzęsienia ziemi wszystkie reaktory uległy samoczynnemu wyłączeniu, dzięki prawidłowemu działaniu systemów bezpieczeństwa. Tsunami z kolei odcięło dopływ prądu i tym samym wyłączyło obieg wody w reaktorach. W elektrowni w Fukushima doszło do wybuchu wodoru i przzerwania ciągłości obudowy reaktorów. Ze względu na utratę możliwości chłodzenia rdzeni reaktorów doszło do ich stopienia. Gorące paliwo, które można porównać do lawy, przepaliło dno zbiornika. Lotne materiały – izotopy cezu, jodu, kryptonu i ksenonu uciekły do atmosfery.

Rys. 11.1 Ciepło powyłączeniowe 2. i 3. reaktora Fukushima Daiichi (reaktor 1. miał mniejszą moc, a reaktory 4., 5. i 6. nie pracowały.
Źródło: [4]



Patrząc w oczy Fukushima

Mimo tych dwu przypadków – Czarnobyla i TMI, które miały miejsce na przestrzeni zaledwie 7 lat, ich wnikliwej i pogłębionej analizy, katastrofa w Fukushima pokazała, jak niedoskonała była polityka bezpieczeństwa jądrowego.

Jednoczesne stopienie rdzeni reaktorów nr 1, 2 i 3, nie wspominając już o trudnej sytuacji zagrożenia ze strony czterech zbiorników ze zużytym paliwem jądrowym, było uważane za zdarzenie o tak małym priorytecie, że się nim nie zajmowano. Skupiono się na procedurach bezpieczeństwa dotyczących poważnej awarii jednego, ale nie dwu, ani trzech reaktorów.



Patrząc w oczy Fukushima cz. 2.

To wielkość kompleksu, złożonego z 6 reaktorów (w momencie uderzenia tsunami połowa z nich była czasowo wyłączona z eksploatacji z powodu prac konserwatorskich), była głównym grzechem projektantów. Usprawiedliwienia można szukać jedynie w tym, że w latach 60-tych XX w. poziom wiedzy był dużo niższy niż to, co wiemy dziś. Niewykluczonym jest, że dzięki zbiegowi w czasie konserwacji i trzęsienia ziemi, uniknęliśmy awarii wszystkich sześciu reaktorów.

Rys. 13.1 Zdjęcie lotnicze elektrowni Fukushima I z zaznaczonymi reaktorami.

Źródło: MLITTA,

<http://tnijurl.com/7c3fc44e8799/>.



Patrząc w oczy Fukushima cz. 3.

Metody probabilistyczne są głównym narzędziem w identyfikowaniu największych zagrożeń, słabych punktów reaktorów. A tych nie brakuje ani w Japonii, ani we Francji. Niemniej jednak nikt nie przygotowywał planu na wypadek scenariusza porównywalnego z Fukushima.

Trudno zmobilizować operatora elektrowni do wzięcia pod rozwagę zjawisk niezwykle mało prawdopodobnych, podczas gdy jest on zalewany codzienną masą innych kłopotów związanych z eksploatacją.¹

Emmanuel Raimond

probabilistyk, specjalista ds. bezpieczeństwa w Instytucie Ochrony przed Promieniowaniem

i Bezpieczeństwa Nuklearnego

Od dziesięcioleci znany jest problem eksplozji wodoru i przebicia zbiornika przez topiące się paliwo jądrowe, jednakże we Francji detektory tych zjawisk zaczęto montować dopiero w roku 2011.

1. „Il est difficile de mobiliser un opérateur sur la prise en compte de phénomènes très peu probables, alors qu’il est assailli d’un flot quotidien d’autres priorités liées à l’exploitation”, za: [1]

Sześć wyzwań, które stawia katastrofa w Fukushima

- Ocena ryzyka katastrofy naturalnej
- Zapewnienie możliwości schłodzenia reaktora
- Zagwarantowanie szczelności obudowy reaktora
- Kontrola topnienia rdzenia
- Organizacja pomocy
- Zarządzanie strefą skażenia

Ocena ryzyka katastrofy naturalnej

Nie jest zaskakującym fakt, że japońscy inżynierowie przystosowali elektrownię w Fukushima do specyfiki związanej z występowaniem w pobliżu wyspy Honsiu, na której to Fukushima leży, trzęsień ziemi. Istotnym jest jednak fakt, że została ona zaprojektowana w ten sposób, by przetrwać wstrząs o sile 8,2 st. w skali Richtera i stawić opór sześciometrowym falom [1]. Trzęsienie z marca 2011 roku miało niemal 10-krotnie większą amplitudę drgań, zaś falochron okalający elektrownię okazał się zbyt niski o prawie cztery metry. Pierwotne plany opracowane przez General Electric zakładały, że elektrownia będzie położona 10 m wyżej [4].

Projektowana wytrzymałość
(lata 60-te XX w.)

8,2 st. w skali Richtera
6-metrowe fale

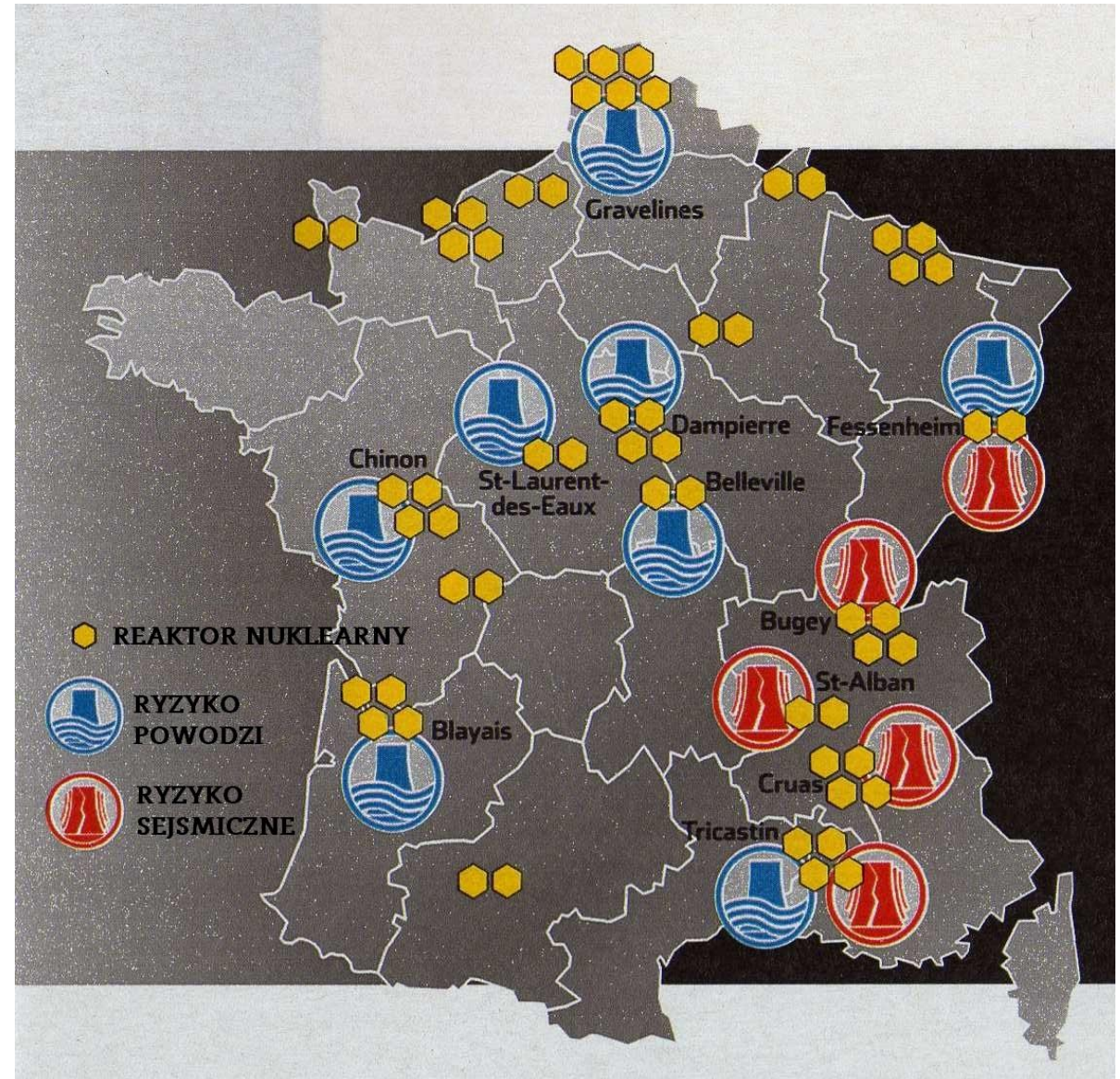
Trzęsienie ziemi i tsunami
(2011 r.)

9 st. w skali Richtera
10-metrowe fale

Ocena ryzyka katastrofy naturalnej cz. 2.

Rzeczą jasną jest, że Francja nie jest państwem w takim stopniu narażonym na ryzyko wstrząsów sejsmicznych czy zalania przez tsunami. Jednakże 38 spośród jej 58 reaktorów rozlokowanych w łącznie 19 miejscach leży na terenach aktywnych sejsmicznie bądź zalewowych (por. rys. 17.1).

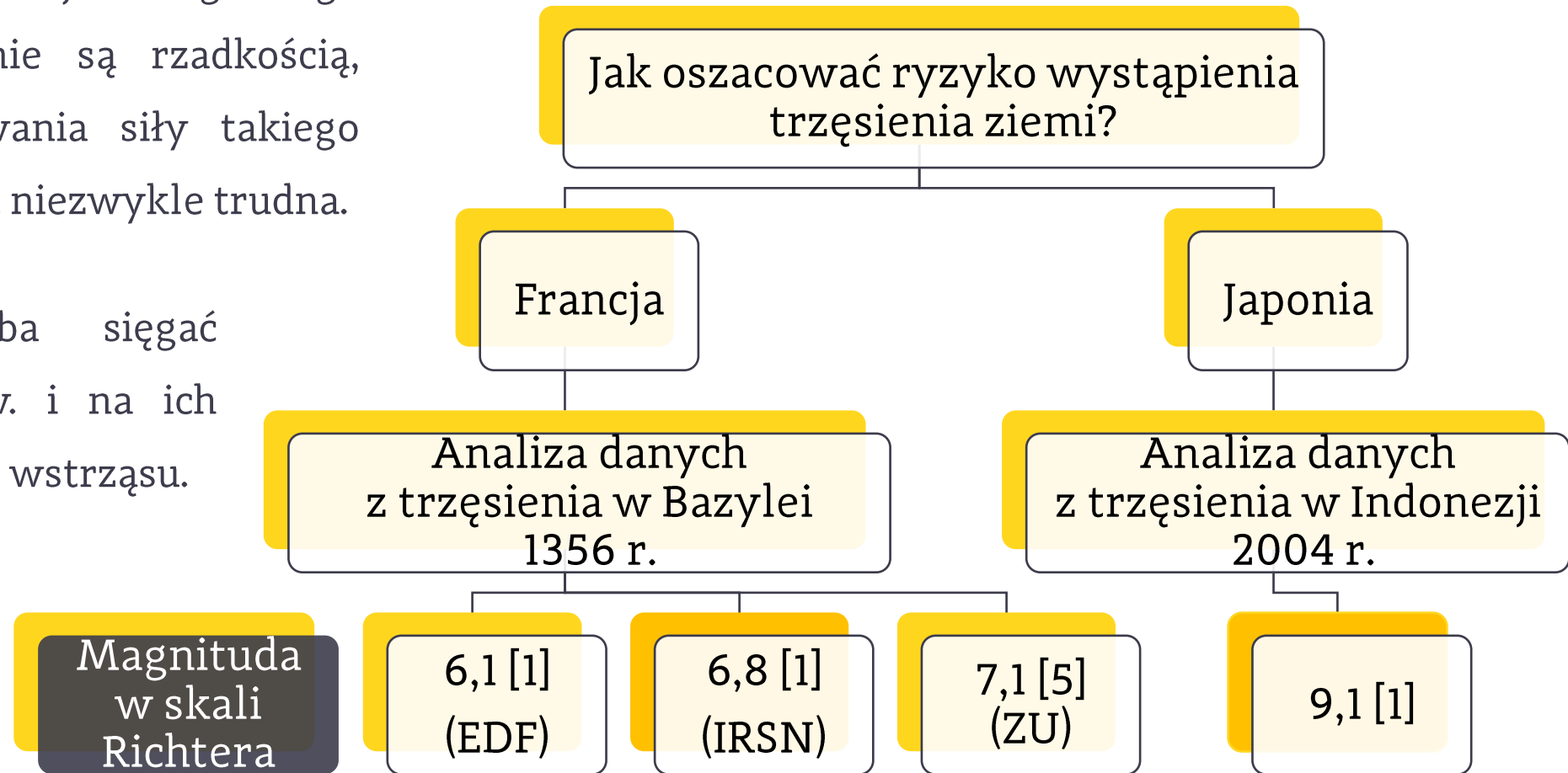
Rys. 17.1 Mapa zagrożeń związanych z funkcjonowaniem elektrowni atomowych we Francji. Źródło: [1].



Ocena ryzyka katastrofy naturalnej cz. 3.

O ile trzęsienia ziemi w rejonie Ognistego Pierścienia Pacyfiku nie są rzadkością, o tyle próba oszacowania siły takiego zdarzenia w Europie jest niezwykle trudna.

Niejednokrotnie trzeba sięgać do zapisków z XIV w. i na ich podstawie szacować siłę wstrząsu.



Ocena ryzyka katastrofy naturalnej cz. 4.

Wydedukowanie z tych archiwów [ksiąg kościelnych i rejestrów notarialnych z XIV w.] charakterystyki trzęsienia ziemi rzeczą łatwą nie jest.¹

*Antoine Schlupp
Francuskie Centralne Biuro Sejsmologiczne*

W związku z trudnościami dot. oszacowania skali trzęsień w obszarze europejskim, istnieje duży margines błędu związany z dostosowywaniem elektrowni jądrowych do przetrwania zdarzeń sejsmicznych. Warto zauważyć, że różnica wartości energii trzęsienia w Bazylei podawanych przez eksploatującą elektrownie firmą EDF a jednymi z nowszych badań Uniwersytetu Zuryskiego jest ponad 30-krotna. Przyjęcie do wiadomości przez EDF informacji o zwiększonej sile wstrząsu wymusiłoby ostatecznie inwestycje związane z modernizacją najstarszej elektrowni jądrowej w Fessenheim (Górny Ren), która położona jest w tym samym aktywnym sejsmicznie obszarze co Bazylea.

Ocena ryzyka katastrofy naturalnej cz. 5.

20

We Francji jednak większym ryzykiem niż trzęsienie ziemi jest powódź i związane z nią podtopienie elektrowni. Aż 8 punktów (por. rys. 17.1), w których rozmieszczone są francuskie reaktory, leży na terenie zagrożonym zalaniem.



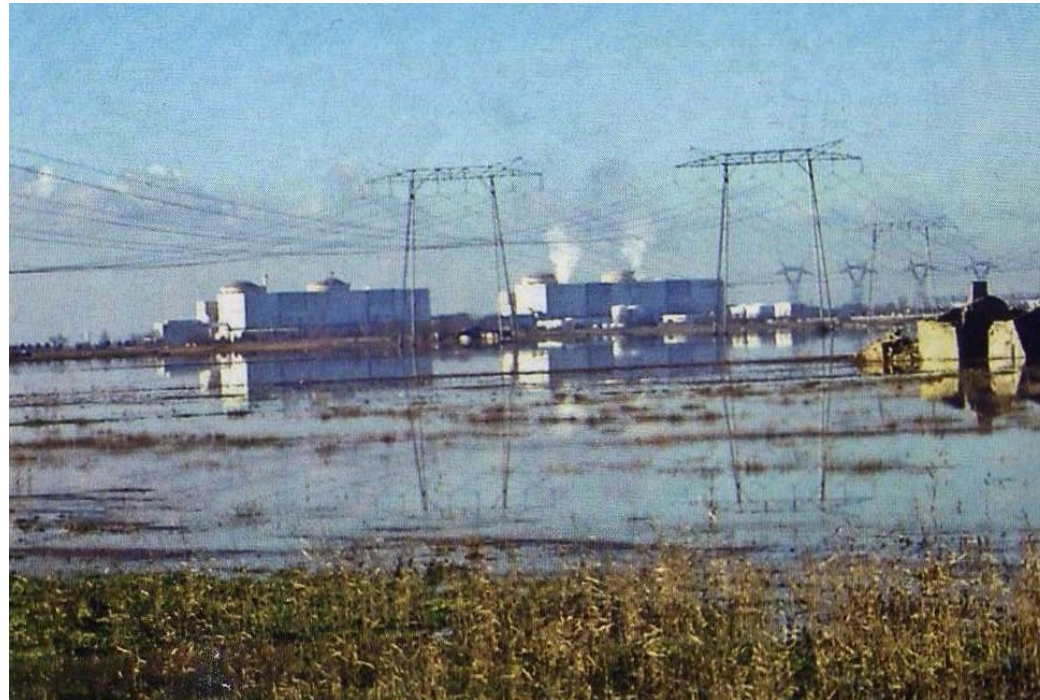
Rys. 20.1 Zamek w Chambord, znajdujący się w okolicach elektrowni St-Laurent-des-Eaux.

Sam, będąc w roku 2010 we Francji, widziałem z okien autobusu elektrownię St-Laurent-des-Eaux (a raczej jej gigantyczne chłodnie kominowe, które są i tak niższe niż zakładano - plany zmieniono tylko po to, by nie psuć krajobrazu z zamku Chambord – rys. 20.1), położoną nad brzegiem Loary, okolicy znanej właśnie z licznych zamków. Takie umiejscowienie elektrowni z jednej strony ułatwia pozyskanie wody do systemów chłodzących reaktor, z drugiej zaś stanowi wielkie zagrożenie dla samej placówki.

Ocena ryzyka katastrofy naturalnej cz. 6.

Podczas burzy przechodzącej w grudniu 1999 r. przez departament Żyronda została zalana elektrownia jądrowa w Blayais. Fala wody (cofka powodziowa) podtopiła pompy pierwotnego obiegu wody. Awaria nie spowodowała zagrożenia na populację [6].

Rys. 21.1 Zalana elektrownia jądrowa w Blayais, grudzień 1999 r.
Źródło: [1].



Ocena ryzyka katastrofy naturalnej cz. 7.

Francuska Agencja Bezpieczeństwa Nuklearnego (ASN) ogłosiła w grudniu 2010 r., że w przypadku powodzi, której prawdopodobieństwo wystąpienia można określić 1:1000 lat, kanał retencyjny Donzère-Mondragon nie zapewni odpływu wody z Rodanu i doprowadzi to do problemów w elektrowni Tricastin.

Pierwsza lekcja, którą należy odrobić po Fukushima: przygotować się na konfrontację z katastrofą o niewidzianej dotąd sile i nie zakładać *a priori*, że zdarzenia takie są niemożliwe.

Nie rozważaliśmy skumulowanego trzęsienia ziemi i powodzi.¹

*André-Claude Lacoste,
prezes Agencji Bezpieczeństwa Nuklearnego*

Zapewnienie możliwości schłodzenia reaktora

Wobec awarii systemu chłodzenia, będącego piętą achillesową praktycznie każdej elektrowni jądrowej, operator Fukushima I, pośród tak wyrafinowanych i niezwykle skomplikowanych systemów, musiał zdać się na metodę chłodzenia reaktora z użyciem wody pompowanej przez straż pożarną.

Rys. 23.1 Akcja chłodzenia rdzenia reaktora.

Źródło: R. Boueisho,
<http://tnijurl.com/bc21175be78b/>.



Zapewnienie możliwości schłodzenia reaktora cz. 2.

24

Badania bezpieczeństwa pokazały w latach 90-tych XX w., że ryzyko stopienia rdzenia było prawie takie samo dla działającego i wyłączanego reaktora!¹

*Emmanuel Raimond
Instytut Ochrony przed Promieniowaniem
i Bezpieczeństwa Nuklearnego*

W Fukushima systemy bezpieczeństwa automatycznie wyłączyły reaktor po wstrząsie. Jednak serce reaktora, jego rdzeń, wciąż biło, a w wyniku zachodzących rozpadów promieniotwórczych wydzielało gigantyczne ilości ciepła powyłączeniowego.

1. „Les études de sûreté ont montré dans les années 1990 que le risque de fusion du cœur était à peu près le même pour un réacteur en marche et à l'arrêt!”, za: [1]



Zapewnienie możliwości schłodzenia reaktora cz. 3.

Według amerykańskich i francuskich ekspertów w dziedzinie bezpieczeństwa Japończycy popełnili błąd używając wody morskiej do chłodzenia rdzenia, albowiem odkładająca się sól mogła doprowadzić do zapchania obiegu wody i przerwać możliwość dalszego chłodzenia.

We Francji każda jednostka reaktorowa wyposażona jest w dwie niezależne linie energetyczne, w dwie grupy generatorów Diesla (z zapasem paliwa na tydzień pracy) i generator „ostatniej szansy”. Elektrownie opierają się także na różnych źródłach chłodzenia.

Zdarzyła się też sytuacja, kiedy w wyniku zbyt szybkiego zużycia się części silników w generatorach Diesla pod znakiem zapytania należało postawić prawidłowość działania 26 grup generatorów prądu elektrycznego.

Rys. **25.1** Elektrownia Cruas.
Źródło: Yelkrokoyade,
<http://tnijurl.com/7610ffa69d8a/>



Zapewnienie możliwości schłodzenia reaktora cz. 4.

Mroźnej nocy z 8 na 9 stycznia 2009 r. zamarzył kanał doprowadzający wodę do pewnego budynku. Nie byłoby w tym właściwie nic groźnego, gdyby nie fakt, że koniec tego kanału znajdował się w elektrowni Chooz (Ardeny) i o mały włos nie spowodował całkowitego odcięcia systemu chłodzenia reaktora.

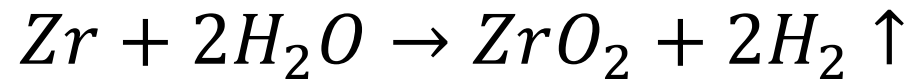
W innych okolicznościach zapchała się rura doprowadzająca wodę do reaktora nr 4 elektrowni Cruas (Ardèche) (por. rys. 25.1), a doprowadziło do tego nagromadzenie się roślin wodnych w stacji pompowania wody z Rodanu. Prawie dziesięć godzin do usunięcia usterki elektrownia działała w oparciu o systemy awaryjne.

Rys. 26.1 Elektrownia Chooz. Źródło: R. Spekking, <http://tnijurl.com/5ea2937958a7/>



Zapewnienie szczelności obudowy reaktora

Zalewanie gorącego reaktora wodą jest niezbędne w celu jego schłodzenia. Jednak należy wziąć pod uwagę to, że w wyniku reakcji chemicznej z wchodzącym w skład koszulek prętów paliwowych cyrkonem następuje wydzielanie wodoru. Doprowadza to do nagłego wzrostu ciśnienia wewnątrz obudowy [4].



Rys. 27.1 We Francji normy przewidują, że obudowa ma wytrzymać ciśnienie 8 barów, ale po przekroczeniu 6 barów, musi nastąpić otwarcie zaworów dekompresyjnych. Wiąże się to z uwolnieniem substancji radioaktywnych do powietrza.
Źródło: [1].

Zapewnienie szczelności obudowy reaktora cz. 2.

Procedury związane z bezpieczeństwem przewidują, iż w ciągu pierwszych kilkunastu godzin po awarii należy przede wszystkim utrzymać ciśnienie wewnątrz obudowy reaktora poniżej wartości 6 barów. Po ewakuacji społeczeństwa, można otworzyć zawory dekompresyjne. Ma to nastąpić najwcześniej w ciągu doby od awarii.



Zapewnienie szczelności obudowy reaktora cz. 3.

Three Mile Island –
wybuch po 10 h od awarii

Dane pokazują, że utrzymanie ciśnienia w obudowie przez 12 – 24 h może być niewykonalne. W TMI wybuch nastąpił po 10 godzinach [1], zaś w Fukushima po niecałych 24 [4].

EJ Fukushima Daichii – wybuch po 23 h 54 min od
tsunami

Francja – możliwość ewakuacji

12 – 24 h po awarii



Zapewnienie szczelności obudowy reaktora cz. 4.

Wielką ostrożność należy stosować w trakcie *procedury U5* - dekompresji obudowy reaktora. Związana z nią emisja substancji radioaktywnych stanowi niesłychane zagrożenie.

Trwają jednak starania, by móc odfiltrować radionuklidy z wypuszczanego powietrza. Électricité de France ma jednak znaczne z tym problemy. Ze względu na zachodzący wewnątrz osłony reaktora szereg reakcji chemicznych jodu z farbą na ścianach powstają niezwykle niebezpieczne związki organiczne. Z kolei na związki rutenu również nie ma na razie rady.

EDF wspólnie z Instytutem Ochrony przed Promieniowaniem i Bezpieczeństwa Nuklearnego pracują nad polepszeniem sposobów filtracji oraz zatrzymaniem atomów najbardziej niebezpiecznych pierwiastków wewnątrz komory.

Kontrola topnienia rdzenia

W momencie, gdy temperatura w reaktorze osiąga wartości kilku tysięcy st. Celsjusza, dochodzi do jednego z najpoważniejszych zjawisk – stopienia rdzenia reaktora. Paliwo zaczyna przecinać beton niczym pocisk kumulacyjny pancierz czołgu.

Grubość warstwy betonu [1]

Wymagana do
zatrzymania
stopionego
rdzenia

20 m

Podłoga osłony
reaktora w
Fessenheim

4,2 m

Temperatura rdzenia:
2000°C

Temperatura topnienia
betonu: 1100°C

Kontrola topnienia rdzenia cz. 2.

Tak naprawdę, nie sposób jest przewidzieć, co stanie się ze stopionym rdzeniem. Symulacja zachowania paliwa jest możliwa właściwie tylko w przypadku nienaruszonych pastylek. Kłopot stanowi zaś sytuacja, w której rdzeń staje się nieforemny. Należy po prostu założyć, że i tak przedrze się przez skorupę osłony i zanieczyści wody gruntowe. Można oczywiście zalać cały reaktor wodą, ale doprowadzi to do gwałtownego parowania i w efekcie eksplozji.

Rys. 32.1 Fukushima:
stopiony rdzeń przenika
podłogę osłony reaktora.
Źródło: [1]



Kontrola topnienia rdzenia cz. 3.

Rys. 33.1 Doświadczenie w laboratorium Francuskiego Komitetu ds. Energii Jądrowej i Odnawialnej dotyczące zachowania stopionego paliwa. Źródło: [1]



Jednym z możliwych rozwiązań problemu przenikania substancji radioaktywnych do wód gruntowych jest ograniczenie przepływu wód podziemnych. Wstępne badania przeprowadzone gruntu wokół elektrowni w Civeaux (departament Vienne) wykazują, że instalację barier należy przeprowadzić w ciągu 10 dni, podczas gdy normalnie trwa ona rok [1]. Z kolei pod reaktorem we Flamanville (Normandia) utworzono specjalny zbiornik, by schwytać stopiony rdzeń.

Kontrola topnienia rdzenia cz. 4.

Cyrkon (Zr)

Niski przekrój czynny dla neutronów – lepsza wydajność procesu rozpadu

W reakcji z bardzo gorącą parą wodną produkuje wodór, burzliwość reakcji rośnie wraz z temperaturą

Wolfram (W)

Podlegający korozji

Drogi

Mało reaktywny z wodą

Porównanie własności fizycznych cyrkonu i wolframu prawie jednoznacznie wskazuje, że to ten pierwszy powinien być używany do produkcji koszulek na pastylki paliwowe. Zr posiada jednak gigantyczną wadę – jest wysoce reaktywny jeżeli chodzi o kontakt z gorącą parą wodną, co właściwie dyskwalifikuje go, z uwagi na niebezpieczeństwo wybuchu wodoru przy awaryjnym chłodzeniu reaktora. EDF używa go jednak ze względów ekonomicznych.

Organizacja pomocy

Według prof. Jeana-Marca Cosset z Instytutu Curie od początku wypadku w Fukushima technicy przyjęli dawkę ok. 100 mSv [1].

Ich kombinezony chroniły jedynie przed radioaktywnymi pyłami, podczas gdy potrzeba grubej warstwy betonu lub ołowiu, by zatrzymać promieniowanie alfa, beta i gamma, które na nich działało¹

*Michel Bourguignon
specjalista medycyny nuklearnej w Agencji Bezpieczeństwa
Nuklearnego*

Zatrważające jest, że od czasu czarnobylskich „likwidatorów” nadal potrzebna jest obecność człowieka na terenie skażonym. Tym bardziej, że Japonia jest jednym z najbardziej zrobotyzowanych krajów świata.

1. „Leurs combinaisons les protègent seulement des poussières radioactives, quand il faudrait un épais mur du béton ou de plomb pour stopper les rayons alpha, bêta et gamma qui s’abattent sur eux” za: [1]



Organizacja pomocy cz. 2.

Grupa Interwencji Zrobotyzowanych Francuskiego Związku Nuklearnego (GIE-Intra) to wyjątkowa organizacja. Jej użyteczność została jednak podana w wątpliwość, po tym jak zaoferowała Japończykom swoją pomoc w 2011 r. Jej roboty nie mogły bowiem pokonywać stromych schodów i wąskich korytarzy elektrowni w Fukushima, nie mówiąc o zgliszczach reaktora.



Rys. 36.1 Sprzęt GIE-Intra.

Źródło: <http://tnijurl.com/1e4d83f3d601/>

Od lat 80-tych XX w. zmieniło się to, że każdy interweniujący pracownik posiada elektroniczny dozymetr.

Normalnie we Francji dawka przyjęta przez pracownika nie może przekroczyć 20 mSv rocznie, w sytuacjach nagłych może ona wzrosnąć do 100 mSv, lub nawet 300 mSv, jeżeli podejmowana interwencja ma ocalić ludzkie życie [1].

Zdarzenie radiacyjne

Wypadek
w elektrowni

Wybuch
brudnej bomby

Setki pracowników
w każdej elektrowni
jądrowej gotowych
do interwencji
w wypadku zdarzeń
radiacyjnych

Elitarne oddziały
policji, żandarmerii
i wojska wraz
ze specjalnym
wyposażeniem

Służby przeznaczone do usuwania szkód wynikłych ze zdarzeń radiacyjnych we Francji

Organizacja pomocy cz. 4.

Kolejnym powodem, dla którego konieczna jest obecność człowieka na miejscu wypadku radiacyjnego, jest obawa przed awarią komputerowych systemów bezpieczeństwa. We Francji, podobnie jak w Fukushima, nie montuje się zaworów dekompresujących osłonę reaktora, które otwierane są automatycznie. Proces wymaga obecności człowieka w pomieszczeniu chronionym służą, z uwagi na duże ryzyko w wypadku przypadkowego otwarcia zaworu. Co ciekawe, wybuchu osłony reaktora nr 3 można było uniknąć otwierając właśnie taki zawór, jednak ze względu na wysoki poziom promieniowania, zbyt ryzykowne było wysyłanie pracownika w rejon reaktora.

Rys. 38.1 Planowa symulacja zdarzenia radiacyjnego w elektrowni Tricastin.
Źródło: [1]



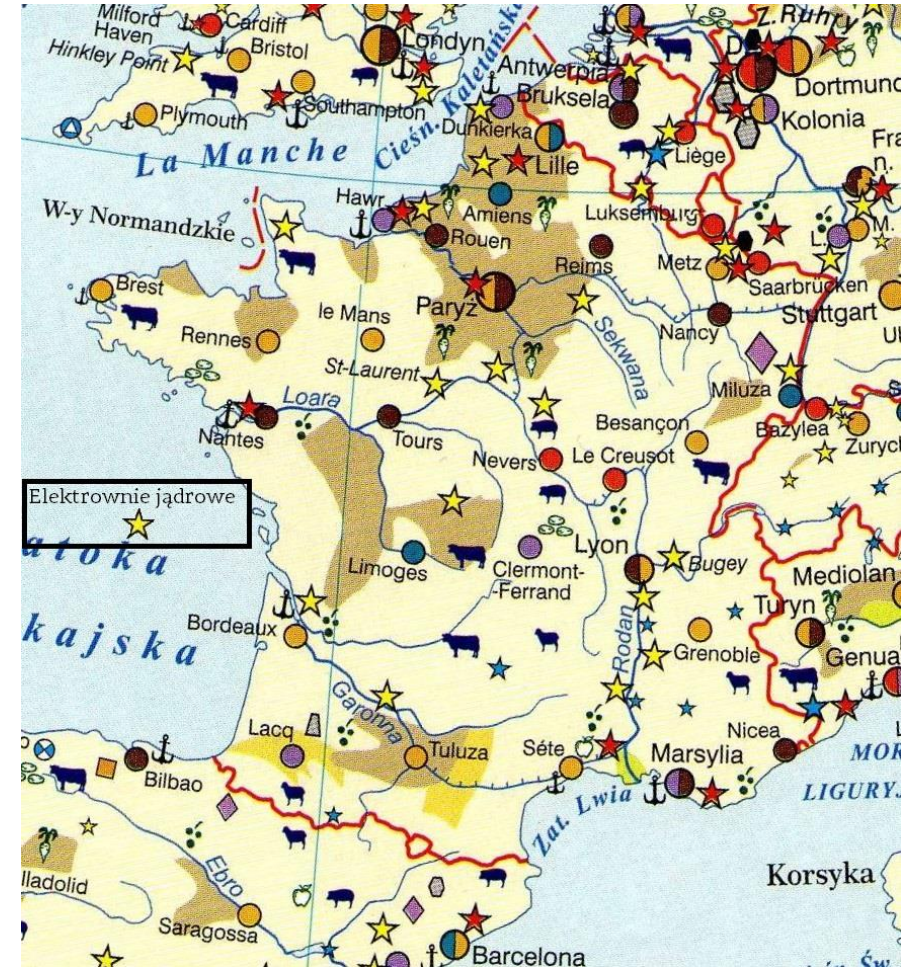
Zarządzanie strefą skażenia

Wojna ze skażeniem musi zacząć się bardzo wcześnie po awarii. Procedury przewidują, że w ciągu zaledwie dwu dni należy wszystkie skupiska ludzi zdekontaminować z użyciem myjek wysokociśnieniowych – należy przemyć chodniki, drogi, ściany oraz dachy. Nienadającą się wodę użytkowną będzie trzeba przelać do najbliższego cieką wodnego, licząc na rozcieńczenie substancji radioaktywnych. Szpitale i lazarety zajmą się dekontaminacją powierzchni ciała narażonych na opad radioaktywny mieszkańców. Wszystkie drzewa zostaną przycięte, kwiaty i małe rośliny wyrwane. Jak mówi prof. Jean-Luc Godet z Agencji Bezpieczeństwa Nuklearnego, przewiduje się nawet wymianę piasku w piaskownicach i zdjęcie 5-10 cm pokrywy gruntu [1].



Reakcje państw bezpośrednio po katastrofie

Tuż po tragedii Niemcy zaczęły planować opuszczenie elitarnego klubu państw z elektrowniami jądrowymi. Chiny zaś zamroziły prace budowy swoich 27 reaktorów. Prezydent Francji Nicolas Sarkozy zapowiedział z kolei, że jego państwo wyciągnie lekcję z tego wypadku. Parlament powołał specjalną komisję, która opublikowała raport ws. bezpieczeństwa elektrowni jądrowych.



Rys. 40.1 Rozmieszczenie elektrowni jądrowych we Francji. Źródło: [8].

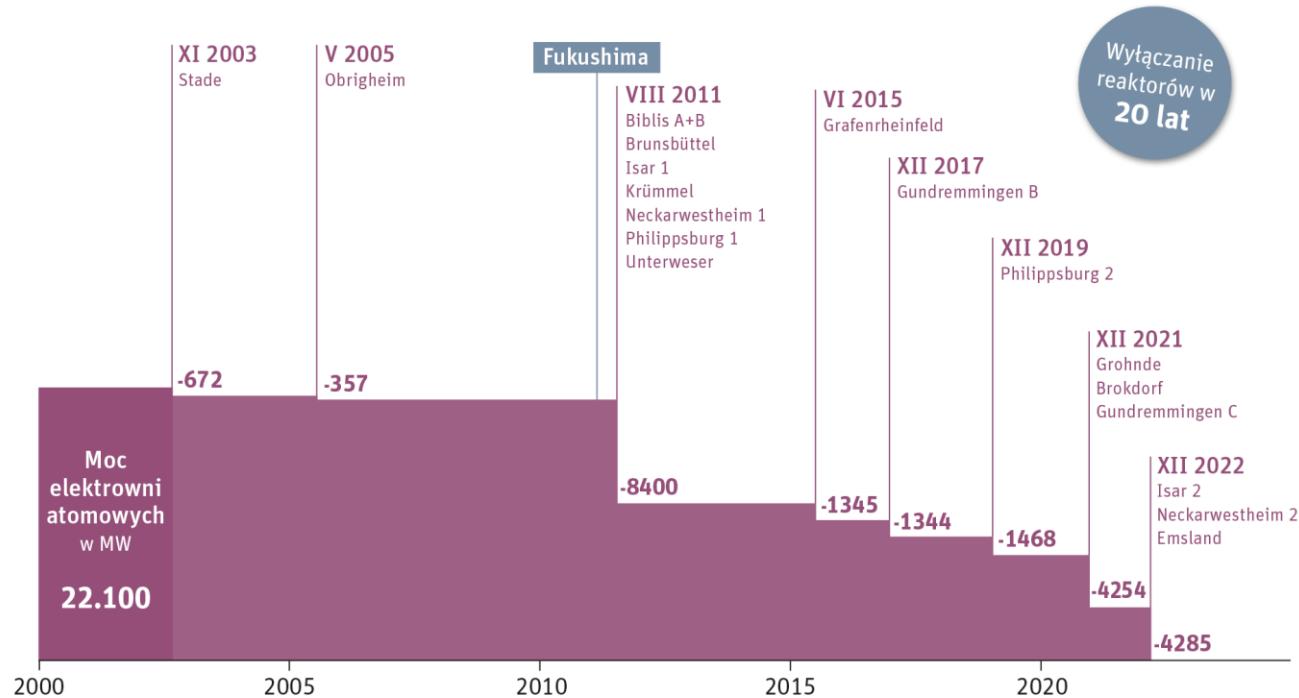
Reakcje państw bezpośrednio po katastrofie cz. 2.



Niemcy stopniowo zamykaj wszystkie elektrownie atomowe

Spadek mocy zainstalowanej reaktorów w Niemczech, 2000–2022

Źródło: Institute of Applied Ecology (Instytut Ekologii Stosowanej), BMJ (Federalne Ministerstwo Sprawiedliwości), obliczenia własne



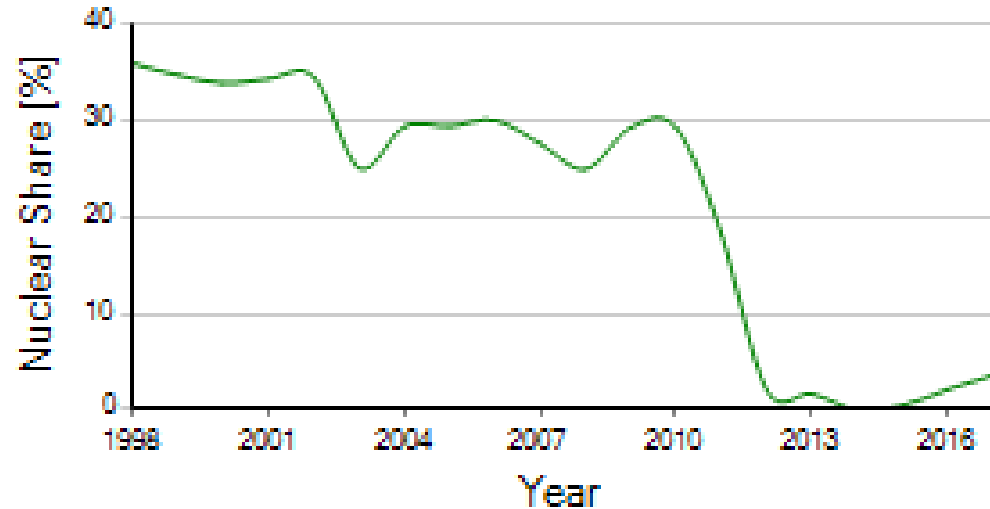
Wyłączenie reaktorów w 20 lat

Sytuacja w Niemczech nie jest spowodowana jedynie katastrofą w Fukushima, ale jest tematem rozgrywki politycznej, próbą przejścia na odnawialne źródła energii zmniejszenia nakładów finansowych na energetykę.

Chociaż konwencjonalne elektrownie jądrowe są już w Niemczech *passé*, to jednak kanclerz Angela Merkel, przecieży fizyk z wykształcenia, nie wstrzymała dotacji na reaktor termojądrowy ITER.

Energy Transition energytransition.org CC BY SA

Reakcje państw bezpośrednio po katastrofie cz. 3.



Rys. 42.1 Spadek produkcji energii elektrycznej ze źródeł jądrowych w Japonii.
Źródło: [9]

W samej Japonii zanotowano gwałtowny spadek produkcji energii elektrycznej z 29,21% w roku 2010 do 1,72% trzy lata później. Obecnie w Japonii funkcjonują 42 reaktory, 18 jest wyłączonych, natomiast budowane są 2 kolejne [9]. W związku z katastrofą ich budowa została wstrzymana na niemal półtora roku, jednak rząd Japonii wraz z inwestorem zdecydowali się ją kontynuować.

Reakcje państw bezpośrednio po katastrofie cz. 4.

Unia Europejska w 2011 roku zleciła testy bezpieczeństwa we wszystkich krajach członkowskich. Opracowano analizy w następujących czterech kategoriach [1]:

- trzęsienia ziemi i powodzie,
- utrata źródła prądu i chłodzenia,
- awarie systemów chłodzenia a także przechowywania zużytego paliwa,
- przerwanie systemów fizycznego zabezpieczenia elektrowni.

Kraj	Liczba reaktorów	Średni wiek reaktorów w 2011 r. w latach	Udział w produkcji energii (%)
Francja	58	26,2	74,1
Wlk. Brytania	19	30,3	17,1
Niemcy	17	29,2	2,9
Szwecja	10	32,3	15,1
Hiszpania	8	28	48,1
Belgia	7	31,2	38,1
Czechy	6	19,8	51,1
Finlandia	4	32,2	28,4
Węgry	4	25,9	28,4
Słowacja	4	19,2	51,7
Europa ogółem	143	25,4	36,7

Reakcje państw bezpośrednio po katastrofie cz. 5.

Stany Zjednoczone Ameryki Północnej pozostały właściwie obojętne na japońską katastrofę. Z danych przedstawionych przez Międzynarodową Agencję Energii Atomowej wynika, że udział produkcji energii przez elektrownie jądrowe nie zmienił się [9]. Próżno też szukać oficjalnych reakcji ze strony Białego Domu.

Chiny z kolei zleciły audyt wszystkich swoich elektrowni jądrowych. Wspomniane wcześniej zamrożenie budowy nowych reaktorów również było bezpośrednią konsekwencją katastrofy w Fukushima. Nie wpłynęło to jednak na dalszą pracę badawczą w chińskich ośrodkach nuklearnych [1].



Reakcje państw bezpośrednio po katastrofie cz. 6.

Co ciekawe, francuski Le Figaro opublikował artykuł „*Pologne: l'ère centrale nucléaire en 2020*” (pol. „Polska: pierwsza elektrownia jądrowa w 2020”) skontrastował działania niemieckiego gabinetu ze stanowiskiem ówczesnym rządem premiera Donalda Tuska. Jego słowa z 31 maja 2011 r. mówiły o tym, że decyzje administracji niemieckiej nie będą miały wpływu na budowę reaktorów na terenie naszego kraju. Z kolei minister gospodarki Waldemar Pawlak zauważył, że decyzja kanclerz Merkel mogła mieć podłoże polityczne ze względu na zbliżające się wybory w Niemczech.

Rok 2020 z perspektywy grudnia 2018 r. jest nierealny. W planach z roku 2014 figurowała data otwarcia 2024 r., doniesienia prasowe z 2015 r. z kolei sugerują, że będzie to rok 2027 [10].

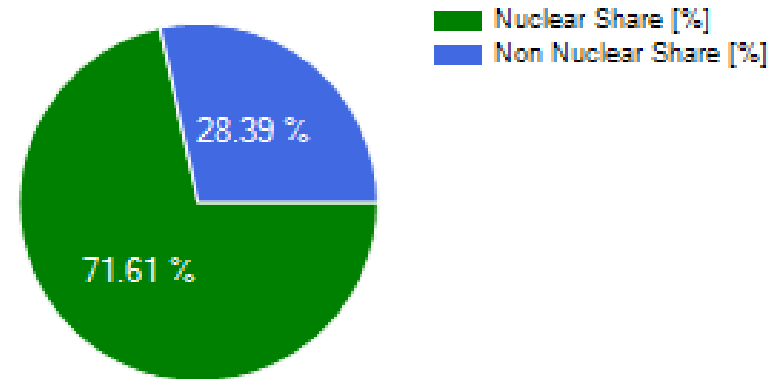
Reakcje we Francji po katastrofie - rząd

Można by się spodziewać, że rząd francuski, zgodnie ze swoimi pierwszymi zapowiedziami szybko przystąpi do obniżenia wkładu procentowego produkcji energii elektrycznej z paliw jądrowych. Nie stało się to jednak, jak widać na rys. 46.1 i 46.2.

Rys. 46.1 Wkład procentowy udziału elektrowni jądrowych w produkcji energii elektrycznej we Francji w 2017 r.

Źródło: IAEA

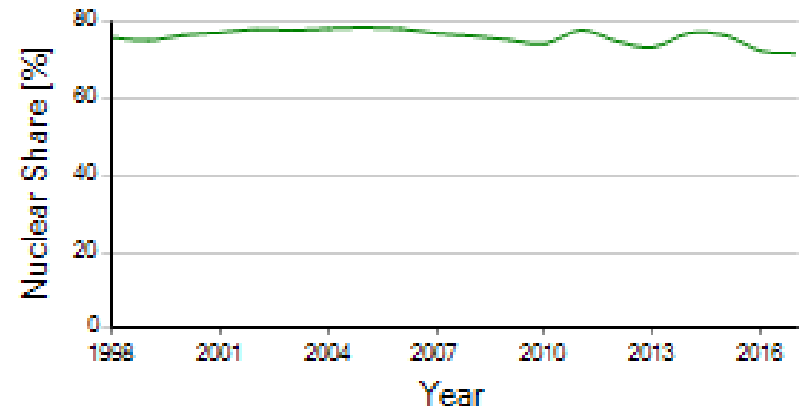
<http://tnijurl.com/ebd088114a79/>



Rys. 46.2 Wkład procentowy udziału elektrowni jądrowych w produkcji energii elektrycznej we Francji w latach 1998-2017.

Źródło: IAEA

<http://tnijurl.com/ebd088114a79/>



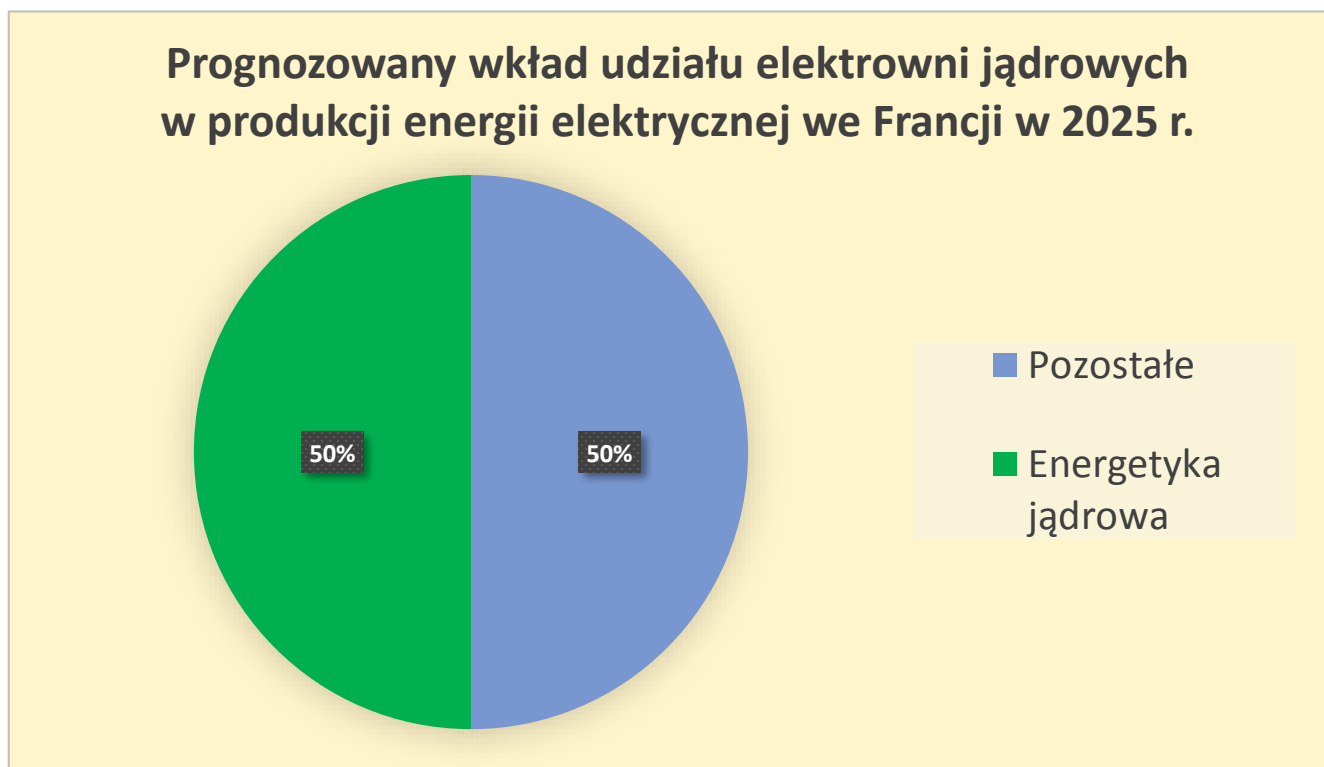
Reakcje we Francji po katastrofie – rząd i EDF

Francuski dziennik Le Monde w artykule z 29 listopada 2018 r. pt. „*Nucléaire : EDF se félicite des orientations prises par le gouvernement*” (pol. „Energetyka jądrowa: EDF z zadowoleniem przyjmuje kierunek działań rządu”) sugeruje, że prezydent Emmanuel Macron idąc na ustępstwa dot. przesunięcia wyłączenia elektrowni jądrowych wykonał de facto plan operatora EDF. Firma bowiem postulowała obniżenie wkładu w produkcję energii elektrycznej w roku 2029, zaś data przyjęta przez rząd – 2027 r. wydaje się kompromisem pomiędzy interesem społecznym a interesem spółki. EDF będzie zabiegać również o wydanie w 2021 r. pozwolenia przez władze na budowę nowoczesnego reaktora typu EPR (europejski reaktor ciśnieniowy) [11].



Reakcje we Francji po katastrofie – Zgromadzenie Narodowe

Francuski Senat w 2014 r. przyjął ustawę obniżającą odsetek produkcji energii elektrycznej do 50% w roku 2025 (por. rys. 48.1). Trudno jest uznać jednak ten cel za realny, nawet wyłączenie elektrowni w Fessenheim – zapowiedziane 22 października 2018 r. – a zaplanowane na lata 2020 i 2022 nie spowoduje obniżenia udziału w bilansie energetycznym o 21 pkt. proc. w porównaniu z rokiem 2017 [12].

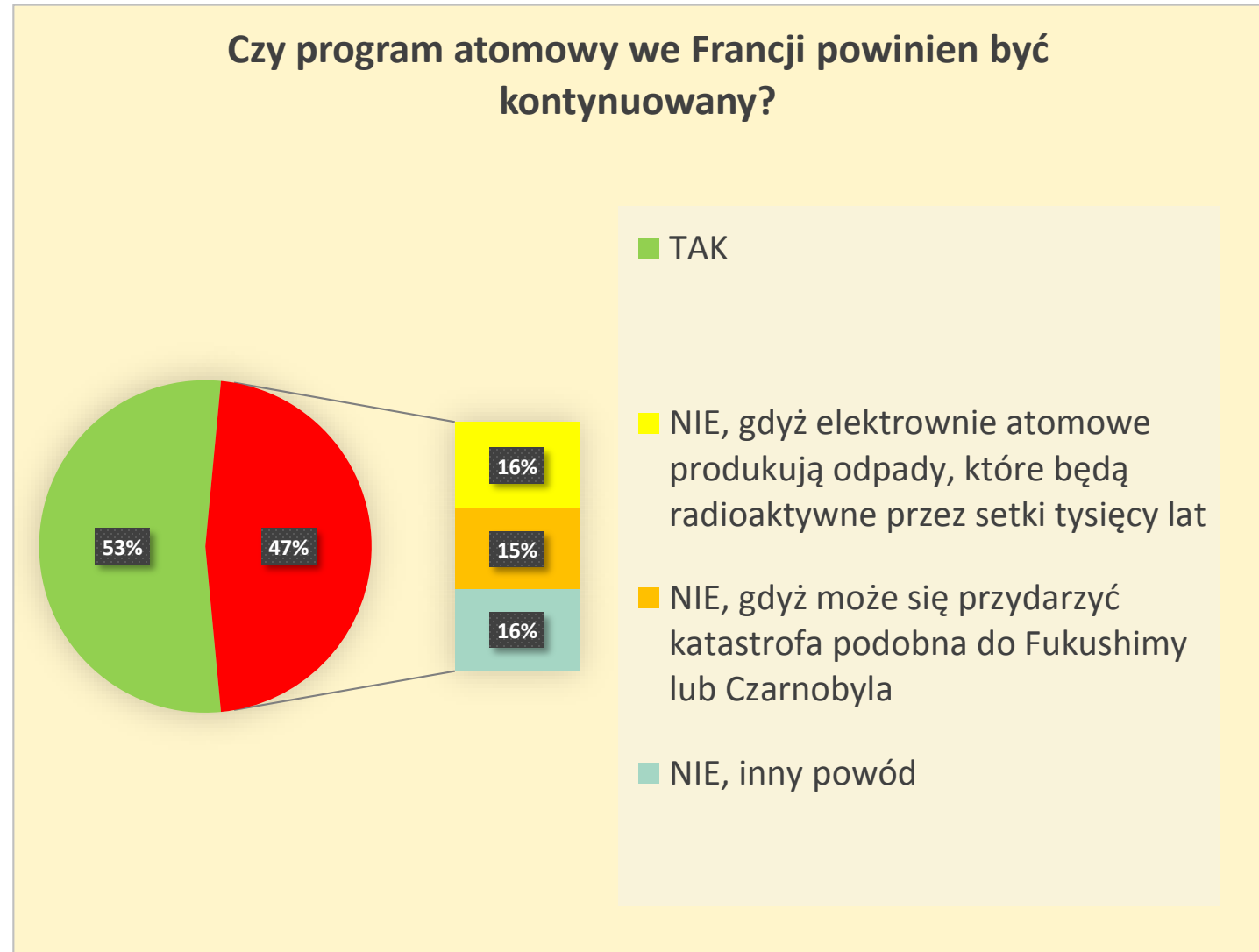


Rys. 48.1 Wkład procentowy udziału elektrowni jądrowych w produkcji energii elektrycznej we Francji w 2025 r.
Źródło danych: Senat Francji,
<http://tnijurl.com/4aabc51f9a56/>

Reakcje we Francji po katastrofie - społeczeństwo

Dane z 2016 r., opublikowane przez Francuski Instytut Badania Opinii Publicznej (IFOP) wykazują głęboki podział społeczny w kwestii kontynuacji polityki atomowej kraju. Warto zauważyć, że co szósty Francuz uważa, że może zdarzyć się katastrofa pokroju Fukushima [7].

Rys. 49.1 Sondaż „Francuzi a energia jądrowa” z 2016 r.
Źródło danych: [7]



Podsumowanie

Katastrofa w Fukushima była doskonałym materiałem do analizy dla francuskich specjalistów w dziedzinie bezpieczeństwa energetyki jądrowej. Wydarzenia z marca 2011 r. pokazały operatorowi elektrowni – firmie EDF, że należy przykładać wagę także do mniej prawdopodobnych scenariuszy awarii. Jednocześnie co roku wszystkie elektrownie jądrowe przechodzą testy nie tylko w postaci kontroli przeprowadzanych przez odpowiednie władze, ale stawiają czoła mniej lub bardziej niecodziennym awariom. Dzięki raportom Parlamentu i agencji pozarządowych w sposób istotny poprawiono procedury bezpieczeństwa we francuskiej energetyce nuklearnej.



Literatura¹

1. Bellanger B. et al., 2011. Les 6 leçons de la catastrophe japonaise, *Science&Vie*, 1124, pp. 88-103.²
2. Villiers M. et al., 2011. Avant-propos, *Science&Vie*, 1124, p. 3.²
3. Raport Komisji Europejskiej, 2010. Les Européens et la sûreté nucléaire³
4. NCBJ, 2013. Dlaczego w elektrowni Fukushima-Daiichi doszło do awarii?⁴
5. Fäh et al., 2009. The 1356 earthquake: an interdisciplinary revision.
6. Mattéi J.M. et al., 2000. Generic results and conclusions of re-evaluating the flooding protection in French and German nuclear power plants.⁵
7. Francuski Instytut Badania Opinii Publicznej, 2016. Les Français et l'énergie nucléaire.⁶
8. Atlas geograficzny: Polska, kontynenty, red. i oprac.: Janusz Dajek et al. Wyd. 7. Warszawa Nowa Era, 2009.²
9. PRIS IAEA, 2018. Power reactor information system.⁷
10. Wikipedia, 2018. Elektrownia Jądrowa Żarnowiec
11. Wakim N., Nucléaire : EDF se félicite des orientations prises par le gouvernement⁸
12. Agence France Presse, 2018. Fessenheim: les deux réacteurs cesseront de fonctionner en 2020 et 2022 au plus tard⁹

1. Jeżeli nie podano inaczej, dostęp w BG PW.

2. Własność autora.

3. Dostęp KE: http://ec.europa.eu/commfrontoffice/publicopinion/archives/ebs/ebs_324_fr.pdf

4. Dostęp NCBJ: <http://ncbj.edu.pl/fukushima/dlaczego-w-elektrowni-fukushima-daiichi-doszlo-do-awarii>

5. Dostęp INIS IAEA: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/33/021/33021372.pdf

6. Dostęp IFOP: https://www.ifop.com/wp-content/uploads/2018/03/3370-1-study_file.pdf

7. Dostęp IAEA: <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/ReactorDetails.aspx?current=867>

8. Dostęp Le Monde: https://www.lemonde.fr/economie/article/2018/11/29/nucleaire-le-satisfecit-interne-du-patron-d-edf_5390257_3234.html?utm_medium=Social&utm_source=Facebook&fbclid=IwAR1U_iivHEoZYi-mSQEuaFraSTJl8fHGIK5aAkS0LVfrh6EMIo8BxGwmLDw#Echobox=1543489215

9. Dostęp AFP: https://www.connaissancedesenergies.org/afp/fessenheim-les-reacteurs-devront-sarreter-en-2020-et-2022-au-plus-tard-181022?utm_source=newsletter&utm_medium=fil-info-energies&utm_campaign=newsletter/le-fil-info-energies-22-oct-2018

