

STOWARZYSZENIE EKOLOGÓW NA RZECZ ENERGII NUKLEARNEJ

Energetyka jądrowa Japonii

Katastrofa w elektrowni jądrowej Fukushima

Krzysztof Rzymkowski

2015-03-17

Przebieg awarii w elektrowni jądrowej Fukushima Daichii wywołanej falą tsunami i usuwanie jej skutków

Spis treści

1. Wstęp

2. Energetyka Jądrowa w Japonii

- 2.1. Początki rozwoju energetyki jądrowej
- 2.2. Przyczyny, rozwój i prognozy energetyki jądrowej w Japonii
- 2.3. Prace badawcze
- 2.4. Japońska sieć elektrowni jądrowych
- 2.5. Elektrownia Fukushima Daiichi
- 2.6. Zasady pracy reaktora BWR w elektrowni Fukushima Daiichi

3. Zasięg, przyczyny i przebieg awarii

- 3.1. Bezpośrednie skutki awarii
- 3.2. Przebieg wydarzeń
- 3.3. Podsumowanie

4. Analiza bezpośrednich skutków awarii

- 4.1. Skażenie radioaktywne
- 4.2. Podsumowanie

5. Usuwanie skutków awarii w elektrowni jądrowej Fukushima

- 5.1. Oczyszczanie wody
- 5.2. Usuwanie skutków katastrofy ekologicznej wywołanej falą tsunami

6. Perspektywy energetyki jądrowej

Dr inż. Krzysztof Rzymkowski

Od ukończenia Politechniki Warszawskiej związany z techniką jądrową. (Zakład Doświadczalny Biura Urządzeń Techniki Jądrowej – później POLON, Zjednoczony Instytut Badań Jądrowych w Dubnej, Comitato Nazionale per l'Energia Nucleare Centro Ricerche della Casaccia, Instytut Badań Jądrowych Świerk oraz PAA). Przez 15 lat był inspektorem Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej. Jego rejonem inspekcyjnym był tzw. daleki wschód (Department of Safeguards Operation A), a w szczególności Japonia (w której sumując okresy inspekcji spędził 5 lat), Korea Północna, Indonezja. Aktualnie jest sekretarzem generalnym SEREN Stowarzyszenia Ekologów na Rzecz Energii Nuklearnej oraz redaktorem naczelnymi Kwartalnika EKOATOM



Muzeum techniki w Tamioce (*miejsowość pomiędzy elektrowniami Fukushima Daiichi i Daini z kopią fasady domu narodzin M. Curie- Skłodowskiej ze Starego miasta w Warszawie*)

1. Wstęp

Obecnie energetyka jądrowa (łącznie około 440 pracujących reaktorów, kolejnych 60 w budowie) pokrywa 16% rosnącego światowego zapotrzebowania na energię elektryczną. Stosowane nowoczesne rozwiązania technologiczne zapewniają większą niezawodność, opłacalność, bezpieczeństwo ludności i lepszą ochronę środowiska. Nie ma też w dającej się przewidzieć przyszłości zagrożenia wyczerpania się zasobów paliwa jądrowego. Te fakty, jak również dłuższy okres braku poważniejszych incydentów sprawił, że dotychczas świadomość społeczna i akceptacja tego sposobu pozyskiwania energii rosła.

Katastrofa elektrowni jądrowej Fukushima w Japonii, spowodowana falą tsunami, stała się początkiem szerokiej dyskusji o bezpieczeństwie energetyki jądrowej ze szczególnym uwzględnieniem sprawdzenia stosowanych i planowanych rozwiązań technicznych, opłacalności, perspektywach dalszego jej rozwoju. Podejmowano też temat ochrony środowiska, m.in. z punktu widzenia tzw. idei zrównoważonego rozwoju, zakładającej oszczędną gospodarkę zasobami naturalnymi. Analiza przyczyn katastrofy w elektrowni w Japonii, zastosowanych rozwiązań konstrukcyjnych, wymagań bezpieczeństwa i wdrażania procedur działań awaryjnych rozpoczęła się niemal zaraz po trzęsieniu ziemi i będzie jeszcze długo przedmiotem rozważań i wszechstronnych badań organizacji międzynarodowych, ośrodków badawczych, a przede wszystkim konstruktorów reaktorów.

2. Energetyka Jądrowa w Japonii

2.1. Początki rozwoju energetyki jądrowej

Japonia była pierwszym krajem, który bezpośrednio doświadczył ogromnej siły niszczącej energii jądrowej. W wyniku bombardowania w czasie II wojny Światowej całkowitej zagładzie uległy dwa wielkie miasta i ośrodki przemysłowe (Hiroszima - 06.08.1945 – bomba uranowa U-235, Nagasaki - 09.08.1945 – bomba plutonowa Pu-239), a późne skutki wybuchów jądrowych były odczuwalne przez kolejne lata. Można więc byłoby się spodziewać, że spowoduje to rezygnację na zawsze z wszelkiego rodzaju działalności związanej z wykorzystaniem energii jądrowej.

A jednak w roku 1954 rozpoczęto w Japonii wdrażanie kompleksowego długoterminowego programu badań, rozwoju i wykorzystania energii jądrowej (*Programm for Research, Development and Utilisation of Nuclear Energy*) w oparciu o prawo atomowe. Japońskie prawo atomowe obowiązujące od 1955 r. ogranicza zakres badań energii jądrowej tylko do zastosowań pokojowych. Regulacje prawne mają zapewnić demokratyczne podejmowanie decyzji w zakresie wykorzystania energii jądrowej, niezależność i przejrzystość badań naukowych oraz wszelkich działań związanych z energią jądrową, włączając w to współpracę międzynarodową.

W roku 1956 powołano Komisję Energii Atomowej (*Atomic Energy Comission*), której zadaniem była realizacja opracowanego programu i promowanie energetyki jądrowej dla celów pokojowych. Zgodnie z prawem atomowym, w tym samym roku powołano również inne instytucje zajmujące się badaniami i wprowadzaniem energetyki jądrowej:

- Agencję Naukowo Techniczną (*Science & Technology Agency*),
- Japoński Instytut Badań Energii Atomowej (*Japan Atomic energy Research Instytute JAERI*),
- Towarzystwo Paliwa Jądrowego (*Atomic Fuel Corporation*) przekształcone później w Towarzystwo Reaktorów Energetycznych i Rozwoju Paliwa Jądrowego (*Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation*) bardziej znane, jako PNC (*Power Nuclear Corporation*).

W listopadzie 2000 r. Komisja Energii Atomowej potwierdziła, że energia jądrowa będzie odgrywać w XXI wieku dominującą rolę w energetyce Japonii. Program długoterminowy z 1956 roku był wielokrotnie modyfikowany (7 razy). W maju 1999 zatwierdzono reorganizację Komisji Energii Atomowej powołując sekretariat planowania długoterminowego, którego zadaniem było sformułowanie ostatecznej wersji programu. W listopadzie 2000 roku Komisja Energii Atomowej potwierdziła, że energia jądrowa będzie odgrywać w XXI dominującą rolę w energetyce Japonii.

Od początku wdrażania programu na szeroką skalę prowadzone się badania naukowe w licznych ośrodkach uniwersyteckich (największe w Tokyo i Kyoto) oraz w wielu korporacjach przemysłowych (Hitachi, Mitsubishi, Toshiba) posiadających własne reaktory doświadczalne, zastawy krytyczne i akceleratory.

Japonia należy obecnie do ścisłej czołówki państw prowadzących prace nad rozwojem i unowocześnieniem energetyki jądrowej

2.2. Przyczyny, rozwój i prognozy energetyki jądrowej w Japonii

Rozwijająca się dynamicznie gospodarka Japonii wymaga stałych i stabilnych dostaw energii.

Ponieważ własne naturalne zasoby pierwotnych źródeł energii (węgla, gazu, ropy, uranu) są bardzo ograniczone, dla zaspokojenia niezbędnych potrzeb Japonia jest zmuszona do importu około 80% potrzebnych materiałów. Dodatkowo, położenie na wyspach uniemożliwia sprowadzanie gotowej energii z państw sąsiednich. Dlatego też dążąc do zapewnienia stabilności energetycznej zdecydowano się na intensywny rozwój energetyki jądrowej ze szczególnym uwzględnieniem zamkniętego cyklu paliwowego. Zaletą zamkniętego cyklu paliwowego jest możliwość odzyskiwanie plutonu i niewypalonego uranu do produkcji nowego paliwa tzw. MOX (Mixed – Oxide mieszaniny tlenków plutonu i uranu) oraz zredukowanie odpadów wysoko radioaktywnych, stwarzając pewnego rodzaju długoterminową samowystarczalność.

Pierwszy energetyczny reaktor jądrowy, importowany z Wielkiej Brytanii, o mocy 160 MW (grafitowy, chłodzony gazem) był uruchomiony w lipcu 1960 roku w Tokai (na północ od Tokyo) w prefekturze Ibaraki (elektrownia Tokai I). Był on wykorzystywany do 1998 roku. Rejon Ibaraki od czasu uruchomienia tej pilotowej konstrukcji jest jednym z największych ośrodków naukowo-badawczych w Japonii, skupiającym instytuty, zakłady doświadczalne, laboratoria dysponujące reaktorami, zestawami krytycznymi (w tym jeden z dwóch największych na świecie szybki zestaw krytyczny *FCA – Fast Critical Assembly*) doświadczalnymi zakładami przetwarzania paliwa, jego produkcji, jak również szeregu przechowalników wypalonego paliwa.

Po uruchomieniu pierwszego reaktora rozpoczęto budowę reaktorów lekko wodnych ciśnieniowych (PWR) i wrzących (BWR). Pierwsze trzy w pełni komercyjne reaktory uruchomiono w 1970 r.

W końcu lat siedemdziesiątych koncerny Mitsubishi Heavy Industry Co LTD, Toshiba Co Ltd, Hitachi Co Ltd, posiadały już ogromne doświadczenie umożliwiające samodzielną budowę elektrowni jądrowych, a nawet ich eksport do innych krajów.

Jednym z zadań w programie długoterminowego rozwoju energetyki jądrowej jest wprowadzanie modernizacji elektrowni jądrowych.

Nad planową modernizacją energetyki jądrowej czuwa Ministerstwo Handlu Międzynarodowego i Przemysłu (*Ministry of International Trade and Industry, MITI*) Zgodnie z opracowanymi przez MITI standardami zakłada się modernizację pracujących obecnie reaktorów lekko-wodnych w trzech etapach. W 1 i 2 etapie będą one modyfikowane tak, aby poprawić ich parametry operacyjne np. skrócić czas konserwacji elektronicznych urządzeń sterujących, czas przeładunku rdzenia, modernizację zespołów automatyki, modernizację urządzeń kontrolnych i pomiarowych. W trzecim etapie planuje się zwiększenie mocy reaktorów do 1,3 – 1,4 MW przez zmiany konstrukcyjne rdzeni i paliwa.

Plany rozwoju energetyki Japonii dążą do zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego. W odniesieniu do energetyki jądrowej oznacza to :

- uznanie, że energia jądrowa powinna być głównym źródłem energii elektrycznej
- przemysłowe odzyskiwanie uranu i plutonu z wypalonego paliwa w zamkniętym cyklu paliwowym od 2005 roku
- stopniowy rozwój reaktorów powielających w celu lepszego wykorzystania uranu
- propagowanie i przekonywanie społeczeństwa o zaletach energetyki jądrowej ze szczególnym podkreśleniem bezpieczeństwa tej energetyki.

W marcu 2002 rząd Japonii podjął decyzję o znacznym przyspieszeniu rozwoju energetyki jądrowej w celu uzyskania możliwie szybkiej redukcji emisji gazów wpływających na zmiany klimatyczne, zgodnie z ustaleniami Protokołu Kyoto. W opracowanym w 2001 r. przez MITI perspektywicznym (dziesięcioletnim) planie rozwoju energetyki jądrowej przewidywano wzrost produkcji energii elektrycznej o 30 % (13 000 MW) w wyniku uruchomienia nowych od 9 do 12 elektrowni jądrowych do roku 2011. Plany te będą obecnie modyfikowane ze względu na katastrofę w elektrowni jądrowej Fukushima Daichi.

Przed katastrofą w Japonii pracowały 54 reaktory energetyczne o łącznej mocy 45 520 MW, co stanowi około 30 % całkowitego zapotrzebowania na energię elektryczną w Japonii. W końcowej fazie budowy znajdowały się trzy bloki energetyczne o łącznej mocy 3300 MW, a projektowano dalsze 12 o mocy 14 400 MW.

W 2004 Japońskie forum Przemysłu Atomowego (*Japan Atomic Industrial Forum*) opublikowało raport o perspektywach rozwoju energetyki jądrowej w Japonii. W przedstawionym projekcie przewidywano redukcję emisji dwutlenku węgla o 60%, oraz zmniejszenie zaludnienia o 20% przy jednoczesnym zachowaniu produktu krajowego. Projekt zakładał, że w 2050 r. energetyka jądrowa będzie dostarczać 90 GW, co oznacza podwojenie udziału energii jądrowej pokrywającej w tym czasie 60% całkowitego zapotrzebowania krajowego. Dodatkowo 20 GW (energii cieplnej) uzyskanych z elektrowni jądrowych będzie wykorzystanych do produkcji wodoru.

W lipcu 2005 Japońska Komisja Energii Atomowej (*Atomic Energy Commission*) potwierdziła główne założenia kierunków rozwoju energetyki jądrowej Japonii stwierdzając, że natychmiastowe działania skoncentrują się przede wszystkim na reaktorach lekko wodnych, tak, by po roku 2030 zapewnić pokrycie zapotrzebowania na energię w 30 – 40%, uwzględniając wymianę obecnie pracujących reaktorów przez bardziej zaawansowane technologicznie. Przemysłową instalację szybkich reaktorów powielających przewidziano po 2050 r.

Paliwo wypalone będzie przetwarzane w Japonii. Odzyskane materiały rozszczepialne będą używane do produkcji paliwa MOX. Odpady wysoko-aktywne będą zagospodarowywane po 2010 r.

Japonia rozpoczęła prace badawcze nad reaktorami IV generacji głównie nad szybkimi reaktorami powielającymi. 260 MW. W rejonie Oarai w prefekturze Ibaraki (120 km na północ od Tokyo) uruchomiono w 1977 pierwszy doświadczalny reaktor powielający Joyo, który jest wykorzystywany aż do dziś. W prefekturze Fukui (zachodnie wybrzeże Japonii 20 km od zachód od Tsurugi) uruchomiono w latach 90-tych energetyczny, prototypowy chłodzony sodem reaktor Monju. W maju 2006 rządząca wówczas partia liberalno-demokratyczna (*Liberal Democratic Party*) zobowiązała rząd do przyspieszenia prac nad szybkimi reaktorami powielającymi (FBR), nazywając je techniką narodową.

W kwietniu 2007 rząd Japonii podjął decyzję (przy poparciu Japońskiej Agencji Energii Atomowej – JAEA i Federacji Towarzystw Energetycznych Japonii – *FEPC Federation of Nuclear Power Companies*), że wiodącą firmą, której zadaniem będzie opracowanie szybkich reaktorów powielających zostanie koncern Mitsubishi Heavy Industries, gromadząca doświadczenie w budowie reaktorów od roku 1960.

Po katastrofie elektrowni Fukushima plany rozwoju energetyki jądrowej Japonii na pewno będą zweryfikowane. Należy się jednak spodziewać, że podstawowe kierunki badań nie ulegną zasadniczym zmianom. Należy podkreślić, że akceptacja społeczna dla energetyki jądrowej bardzo zmalała. Przygotowywane są plany i konkretne działania by przywrócić zaufanie do energetyki jądrowej.

2.3. Prace badawcze

Prace badawcze i wdrożeniowe nad różnymi typami reaktorów energetycznych są prowadzone w Japonii nie przerywane od lat sześćdziesiątych. Do ciekawszych rozwiązań należy prototyp zaawansowanego reaktora termicznego ATR (*Advanced Thermal Reactor*) zbudowanego w Fugen. Był to reaktor z moderowany ciężką wodą, chłodzony wodą przystosowany zarówno do paliwa uranowego jak i plutonowego. Był to pierwszy w świecie reaktor z rdzeniem załadowanym całkowicie paliwem MOX. Po kilku latach prac doświadczalnych prowadzonych przez JNC został wyłączony w 2003. Konstrukcję podobnego mocniejszego reaktora przerwano w 1995. Kontynuację badań nad reaktorami ABWR podjęła firma Electric Power Development Corp. znana, jako J-Power starając się o licencję na budowę reaktora o mocy 1383 MWe w Ohma w prefekturze Aomori na północnym skraju wyspy Honshu, którego uruchomienie przewidywano w roku 2012. Prace uległy jednak znacznemu opóźnieniu ze względu na zaostrzenie wymagań odpornościowych na wstrząsy tektoniczne bardzo częste w tym rejonie. Projektowany reaktor miał być pierwszym reaktorem wykorzystującym wyłącznie paliwo MOX podobnie jak Fugen.

Pierwszymi zaawansowanymi reaktorami (1315 Mwe) z wrzącą wodą (ABWR) były reaktory koncernu Tepco (Tokyo Electric Power Co) Kariwa – Kashiwazaki bloki 6 i 7 uruchomione w 1996 – 97 zbudowane przy współpracy Toshiba, Hitachi General Electric (St. Zjed.). Następnie powstawały kolejne bloki Hamaoka-5, Shika -2, Shimane -3.

Pierwsze zaawansowane – udoskonalone (1500 Mwe) reaktory ciśnieniowe (APWR) są konstruowane przez Mitsubishi (w początkowej fazie we współpracy z Westinghouse) uzyskały licencję w 2004 i będą w zespole elektrowni Tsuruga – bloki Tsuruga 3&4. Dalszą kontynuacją tej konstrukcji będą reaktory następnej generacji APWR+ o mocy 1750 Mwe z paliwem MOX.

Koncern Mitsubishi (Mitsubishi Heavy Industries) oferuje obecnie na rynkach Stanów Zjednoczonych i Europy swoje reaktory ABWR 1700 Mwe Uzyskanie pełnej licencji w Stanach Zjednoczonych jest przewidywane na rok 2008. Koncern Mitsubishi współpracował również z koncernem Westinghouse przy konstrukcji reaktora AP1000, jednakże w wyniku przejścia Westinghouse przez koncern Toshiba, opracowuje swoją wersję reaktora.

W końcu roku 1998 uruchomiono prototypowy doświadczalny wysokotemperaturowy reaktor chłodzony helem (*HTTR – High Temperature Engineering Test Reactor*), w którym moderatorem jest grafit. Przewidywanym zastosowaniem tego typu reaktora są procesy termochemiczne umożliwiające produkcję wodoru. Doświadczenia zebrane w czasie eksploatacji reaktora mają być wykorzystane do budowy nowej generacji bloków wysokotemperaturowych chłodzonych helem do zastosowań przemysłowych lub do bezpośredniego napędu turbin gazowych.

2.4. Japońska sieć elektrowni jądrowych

W sieci energetycznej Japonii obowiązują dwa standardy częstotliwości 50 Hz w rejonach północnych i 60 Hz w południowych. Linia podziału przebiega nieco na północ od Tokyo dzieląc Honshiu na połowy.

Właścicielami elektrowni są prywatne firmy energetyczne.

TEPCO - *Tokyo Electric Power Company*,

TOHOKU - *Tohoku Power Plant Company*,

HOKURIKU - *Hokuriku Electric Power Company*,

CHUGOKU - *Chugoku Electric Power Company*,

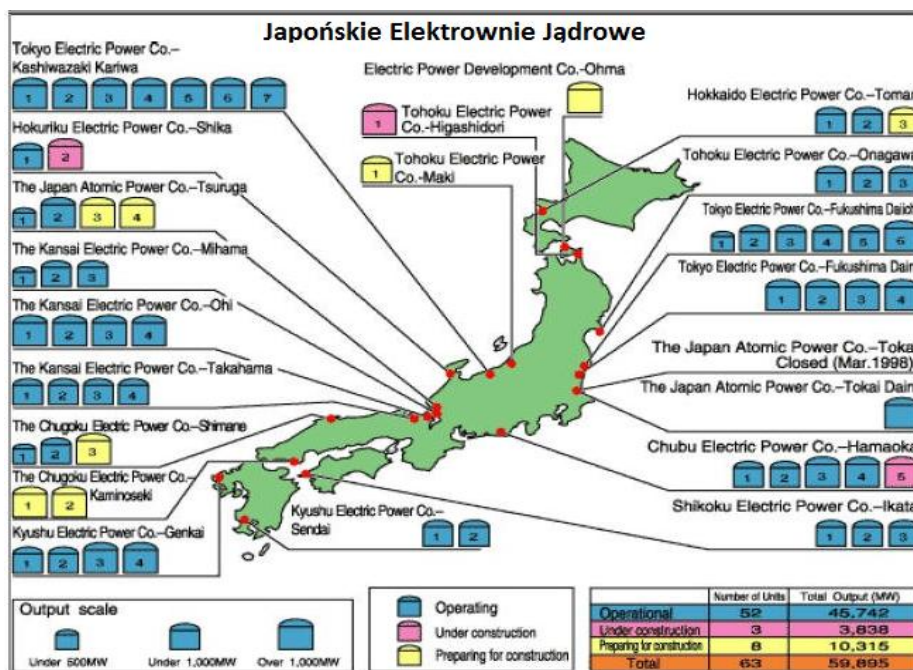
KYUSHU - *Kyushu Electric Power Company*,

HEPCO - *Hokkaido Electric Power Company*,

KEPCO - *Kansai Electric Power Company*)

zrzeszone w Federacji Towarzystw Energetycznych Japonii - FEPC.

Energetyczne reaktory doświadczalne (Fugen, Monju, Joyo) należą do Japońskiej Agencji energii atomowej (JAEA – Japan Atomic Energy Agency), natomiast Tokai 2, Tsuruga 1, Tsuruga 2 należą do Japońskiego Towarzystwa Energii Atomowej (JAPC – Japan Atomic Energy Company). Na rys. 1 przedstawiono lokalizację reaktorów energetycznych w Japonii.



Rys. 1 Lokalizacja japońskich elektrowni jądrowych

Japońskie reaktory energetyczne

| Reaktor | Typ | Moc zainstalowana Mwe | Właściciel | Eksploatacja |
|---------------------------|------|--------------------------|-------------------|------------------|
| Fukushima I-1 | BWR | 439 | TEPCO | Marzec 1971 |
| Fukushima I-2 | BWR | 760 | TEPCO | Lipiec 1974 |
| Fukushima I-3 | BWR | 760 | TEPCO | Marzec 1976 |
| Fukushima I-4 | BWR | 760 | TEPCO | Październik 1978 |
| Fukushima I-5 | BWR | 760 | TEPCO | Kwiecień 1978 |
| Fukushima I-6 | BWR | 1067 | TEPCO | Październik 1979 |
| Fukushima II-1 | BWR | 1067 | TEPCO | Kwiecień 1982 |
| Fukushima II-2 | BWR | 1067 | TEPCO | Luty 1984 |
| Fukushima II-3 | BWR | 1067 | TEPCO | Czerwiec 1985 |
| Fukushima II-4 | BWR | 1067 | TEPCO | Sierpień 1987 |
| Genkai-1 | PWR | 529 | Kyushu | Październik 1975 |
| Genkai-2 | PWR | 529 | Kyushu | Marzec 1981 |
| Genkai-3 | PWR | 1127 | Kyushu | Marzec 1994 |
| Genkai-4 | PWR | 1127 | Kyushu | Czerwiec 1997 |
| Hamaoka-1 | BWR | 515 | Chubu | Marzec 1976 |
| Hamaoka-2 | BWR | 806 | Chubu | Listopad 1978 |
| Hamaoka-3 | BWR | 1056 | Chubu | Sierpień 1987 |
| Hamaoka-4 | BWR | 1092 | Chubu | Wrzesień 1993 |
| Hamaoka-5 | ABWR | 1325 | Chubu | Styczeń 2005 |
| Higashidori-1 | BWR | 1053 | Tohoku | Grudzień 2005 |
| Ikata-1 | PWR | 538 | Shikoku | Wrzesień 1977 |
| Ikata-2 | PWR | 538 | Shikoku | Marzec 1982 |
| Ikata-3 | PWR | 846 | Shikoku | Grudzień 1994 |
| Kashiwazaki-Kariwa-1 | BWR | 1067 | TEPCO | Wrzesień 1985 |
| Kashiwazaki-Kariwa-2 | BWR | 1067 | TEPCO | Wrzesień 1990 |
| Kashiwazaki-Kariwa-3 | BWR | 1067 | TEPCO | Sierpień 1993 |
| Kashiwazaki-Kariwa-4 | BWR | 1067 | TEPCO | Sierpień 1994 |
| Kashiwazaki-Kariwa-5 | BWR | 1067 | TEPCO | Kwiecień 1990 |
| Kashiwazaki-Kariwa-6 | ABWR | 1315 | TEPCO | Listopad 1996 |
| Kashiwazaki-Kariwa-7 | ABWR | 1315 | TEPCO | Lipiec 1997 |
| Mihama-1 | PWR | 320 | Kansai | Listopad 1976 |
| Mihama-2 | PWR | 470 | Kansai | Lipiec 1972 |
| Mihama-3 | PWR | 780 | Kansai | Grudzień 1976 |
| Ohi-1 | PWR | 1120 | Kansai | Marzec 1979 |
| Ohi-2 | PWR | 1120 | Kansai | Grudzień 1979 |
| Ohi-3 | PWR | 1127 | Kansai | Grudzień 1991 |
| Ohi-4 | PWR | 1127 | Kansai | Luty 1993 |
| Onagawa-1 | BWR | 498 | Tohoku | Czerwiec 1984 |
| Onagawa-2 | BWR | 796 | Tohoku | Lipiec 1995 |
| Onagawa-3 | BWR | 796 | Tohoku | Listopad 1985 |
| Sendai-1 | PWR | 846 | Kyushu | Lipiec 1984 |
| Sendai-2 | PWR | 846 | Kyushu | Listopad 1985 |
| Shika-1 | BWR | 505 | Hokoriku | Lipiec 1993 |
| Shika-2 | BWR | 1304 | Hokuriku | Marzec 2006 |
| Shimane-1 | BWR | 439 | Chugoku | Marzec 1974 |
| Shimane-2 | BWR | 791 | Chugoku | Luty 1989 |
| Takahama-1 | PWR | 780 | Kansai | Listopad 1974 |
| Takahama-2 | PWR | 780 | Kansai | Listopad 1975 |
| Takahama-3 | PWR | 830 | Kansai | Styczeń 1985 |
| Takahama-4 | PWR | 830 | Kansai | Czerwiec 1985 |
| Tokai-2 | BWR | 1056 | JAPC | Listopad 1978 |
| Tomari-1 | PWR | 550 | Hokkaido | Czerwiec 1989 |
| Tomari-2 | PWR | 550 | Hokkaido | Kwiecień 1991 |
| Tsuruga-1 | BWR | 341 | JAPC | Marzec 1970 |
| Tsuruga-2 | PWR | 1115 | JAPC | Luty 1987 |
| Razem 55 reaktorów | | | 47 577 Mwe | |

Fukushima I – Fukushima Daichi (Fukushima pierwsza)

Fukushima II – Fukushima Daini (Fukushima druga)

Oba zespoły elektrowni znajdują się w prefekturze Fukushim

Japońskie reaktory energetyczne w budowie

| Reaktor | Typ | Przewidywana Moc zainstalowana Mwe | Właściciel | Początek budowy | Oddanie do eksploatacji |
|------------------|----------|------------------------------------|------------|-----------------|-------------------------|
| Tomari-3 | PWR | 912 | Hokkaido | 2003 | 2009 |
| Shimane-3 | ABWR | 1373 | Chugoku | Grudzień 2005 | Grudzień 2001 |
| Razem 2 reaktory | 2285 Mwe | | | | |

Planowane japońskie reaktory energetyczne zamówione lub zgłoszone do przetargu

| Reaktor | Typ | Przewidywana Moc zainstalowana Mwe | Właściciel | Początek budowy | Oddanie do eksploatacji |
|--------------------|--------------|------------------------------------|--------------|--|-------------------------|
| Ohma | ABWR | 1383 | EPDC/J-Power | Maj 2008 | Marzec 2012 |
| Fukushima 1-7&8 | ABWR | 1380 | TEPCO | Kwiecień 2010 | Październik 2014-15 |
| Higashidori 1&2 | ABWR | 1385 | TEPCO | Listopad 2009&2012 | Październik 2014-18 |
| Tsuruga 3&4 | APWR | 1538 | JAPC | Październik 2010 | 2015-17 |
| Kaminoseki 1&2 | ABWR | 1373 | Chugoku | 2010/2013 | 2015&18 |
| Higashidori 2 | ABWR | 1385 | Tohoku | 2014 | 2019 |
| Namie-odaka | BWR | 825 | Tohoku | 2014 | 2019 |
| Sendai 3 | PWR | 1100? | Kyushu | Przetarg prowadzony przez władze lokalne | |
| Razem 12 reaktorów | 16 045 Mwe | | | | |
| Monju | Prototyp FBR | JAEA | | W eksploatacji 1994-95 w oczekiwaniu na ponowne uruchomienie | |

Należy podkreślić, że awaryjność elektrowni jądrowych w Japonii jest bardzo niska. Największe zagrożenie – wady konstrukcji zbiornika reaktory wykryto w elektrowni Fukushima. Uszkodzony blok został wyłączony. Niezwykle ważnym problemem, który musi być uwzględniany przy projektowaniu i budowie reaktorów w Japonii jest ich odporność na wstrząsy tektoniczne i trzęsienia ziemi występujące szczególnie często na północnej części wyspy Honsiu w pobliżu Hokkaido oraz odporność na bardzo silne wiatry – tajfuny, na które najczęściej narażone są elektrownie znajdujące się na południu kraju.

System zabezpieczeń przed wstrząsami i trzęsieniami ziemi jest w Japonii bardzo rozbudowany i przy silniejszych zakłóceniach uruchamiane są automatycznie systemy awaryjne np. zatrzymanie pociągów w zagrożonym terenie. Najsilniejsze do roku 2011 trzęsienie ziemi (sile 6-7 stopni w skali Richtera) zarejestrowano w pobliżu elektrowni jądrowej miało miejsce w czerwcu 2007 r. w elektrowni Kariwa Kashiwazaki. Spowodowało ono wyłączenie tej największej elektrowni jądrowej na około 10 miesięcy. **Należy podkreślić, że powodem wyłączenia były szkody wywołane głównie w infrastrukturze elektrowni. Reaktory nie uległy uszkodzeniu.** Nowe informacje o odporności urządzeń elektrowni uzyskane w wyniku tej awarii spowodowały konieczność zweryfikowania założeń konstrukcyjnych projektowanych Higashidori 1&2 i Fukushima Daichi 7&8 i dalsze opóźnienia w ich budowie.



Rys.2 Elektrownia Fukushima Daiichi przed i po awarii

TEPCO (*Tokyo Electric Power Company*)

Właścicielem elektrowni Fukushima Daiichi i Daini jest TEPCO. Powstały w 1951 koncern był do niedawna potentatem na rynku energii. Tepco jest największym w Azji koncernem energetycznym i jednym z największych koncernów światowych (RWE, Électricité de France i E.ON). TEPCO jest właścicielem hydroelektrowni (160 o łącznej mocy 8520 MW), elektrociepłowni (wykorzystujących węgiel, ropę, gaz - 30 bloków energetycznych), elektrowni jądrowych (Kariwa Kashiwazaki, Fukushima Daichi, Fukushima Daini, Higashidori - 17 reaktorów), a także elektrowni doświadczalnych, wykorzystujących biomasę, wiatr, słońce, źródła geotermiczne, odpady.

Paliwa kopalne

| Elektrownia | Bloki energetyczne | Moc [MW] |
|------------------|--------------------|-------------------------|
| Anegasaki | 3x600MW | 3600 |
| Sodeguara | | 3600 |
| Futtsu | 4 | 5000 |
| Kashima | | 4400 |
| Hirono | | 3800 |
| Oi Thermal | 1 | 1050 |
| Shinagawa | 1 | 1140 |
| Yokosuka | 3 +4 (pomocnicze) | 730 + 1400 (pomocnicze) |
| Kawasaki | 1 (w budowie) | 3000 |
| Yokohama | 4 | 3325 |
| Minami Yokohama | 3 | 1150 |
| Higashi Ogishima | 2 | 2000 |

Przed wydarzeniami w Fukushimie planowano, że w roku 2019 dostarczana na rynek energia elektryczna wytwarzana przez TEPCO będzie pochodziła z hydroelektrowni (13%), elektrowni węglowych (5%), gazowych (37%), jądrowych (30%), wykorzystujących ropę (15%). Obecnie, po utracie 80% wartości akcji, TEPCO jest na skraju bankructwa, wśród komentatorów coraz częściej mówi się o nacjonalizacji, choć według ostatnich doniesień rząd ma przejąć nie więcej niż 50% akcji niedawnego giganta.

2.5. Elektrownia Fukushima Daiichi

Podobnie jak wszystkie pracujące i projektowane japońskie elektrownie jądrowe jest ona wybudowana bezpośrednio nad brzegiem morza, w tym przypadku Oceanu Spokojnego.

Taka lokalizacja posiada szereg zalet, przede wszystkim umożliwia wykorzystanie wody morskiej, jako wody chłodzącej, co przy ograniczonej ilości słodkowodnych zbiorników wodnych w głębi lądu jest najlepszym i ekonomicznie uzasadnionym rozwiązaniem. Wszystkie japońskie elektrownie jądrowe posiadają własne porty, co ułatwia transport świeżego, jak i wypalonego paliwa bezpośrednio z elektrowni do lub z innych zakładów przemysłowych (zakładów produkcji paliwa, zakładów przerobu) odciążając lądowe drogi komunikacyjne. Istotną wadą takiego usytuowania elektrowni jest trudna do przewidzenia (jak to pokazało ostatnie trzęsienie ziemi) wysokość ewentualnej fali tsunami. Elektrownia Fukushima jest położona na wysokości około 5 m nad lustrem wody w fazie przypływu i miała opierać się fali tsunami wysokości do 5 m. Elektrownia Fukushima Daini położona w odległości około 12 km na południe od Fukushimy Daiichi przy podobnej zabudowie i usytuowaniu nie uległa tak silnym zniszczeniom wywołanym falą tsunami ze względu na bardziej nowoczesne rozwiązania konstrukcyjne.

Elektrownia Fukushima Daiichi

| | Blok 1 | Blok 2 | Blok 3 | Blok 4 | Blok 5 | Blok 6 |
|-----------------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|
| Moc (MW) | 460 | 784 | 784 | 784 | 784 | 1100 |
| Decyzja budowy (projekt) | 25 12 1968 | 22 12 1967 | 23 05 1969 | 30 06 1971 | 26 02 1971 | 17 12 1971 |
| Uzyskanie Licencji | 19 11 1968 01 04 1969 | 18 09 1967 29 01 1968 | 01 07 1969 23 01 1970 | 05 08 1971 13 01 1972 | 22 01 1971 23 09 1971 | 21 12 1971 12 12 1972 |
| Włączenie do sieci | 26 03 1971 | 18 07 1974 | 27 03 1976 | 12 19 1978 | 18 04 1978 | 24 10 1979 |
| Zestawy Paliwowe w rdzeniu | 400 | 548 | 548 | 548 | 548 | 764 |
| Ilość ton U | 69 | 94 | 94 | 94 | 94 | 132 |
| Reaktor | Mark I | Mark I | Mark I | Mark I | Mark I | Mark II |
| Wykonawca | General Electric | General Electric & Toshiba | Toshiba | Hitachi | Toshiba | General Electric & Toshiba |

Z przedstawionej tabeli wynika, że wzrost wytwarzanej energii w elektrowni Fukushima Daiichi uzyskano głównie poprzez zwiększenie ilości materiału jądrowego (uranu) w rdzeniu reaktora, bez dokonywania ulepszeń konstrukcyjnych, które wprowadzono dopiero w bloku 6.. W reaktorach jądrowych, w elektrowniach Fukushima Daiichi i Daini paliwem jądrowym jest nisko wzbogacony uran. (Stosunek izotopu U^{235} do U^{238} określa stopień wzbogacenia uranu. Zasadnicze znaczenie dla energetyki jądrowej ma uran rozszczepialny U^{235}). Najczęściej stopień wzbogacenia wymaganego dla funkcjonowania reaktorów energetycznych nie przekracza 5,5 %. W sierpniu 2010 roku, zgodnie planowaną zmianą stopniowego wprowadzania bardziej wydajnego paliwa w reaktorach lekko wodnych, do reaktora bloku 3 (elektrownia Daiichi) załadowano doświadczalnie oprócz nisko wzbogaconego uranu, paliwo MOX (*Mixed Oxide* - mieszanina tlenków uranu i plutonu). W sąsiadującej z elektrownią Fukushima Daiichi elektrowni Fukushima Daini zastosowano bardziej zaawansowaną technologię (bloki 2, 3, 4), jedynie blok 1 ma konstrukcję identyczną z blokiem 6 Fukushimy Daiichi. Ilość materiału jądrowego w rdzeniach jest we wszystkich blokach identyczna.

Jednym z działań podjętych w celu pełnej realizacji długoterminowego rozwoju energetyki jądrowej jest zwiększenie współczynnika wykorzystania

reaktora, tzn. wielkości określającej stosunek liczby godzin pracy reaktora do liczby godzin w danym roku wyrażony w procentach. Przerwy w pracy reaktora są planowane i wynikają z przeładunku paliwa jak i m.in. z konieczności kontroli.

Współczynnik wykorzystania reaktorów Fukushima Daiichi

| Rok | Blok 1 | Blok 2 | Blok 3 | Blok 4 | Blok 5 | Blok 6 |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1971 | 66,2 | | | | | |
| 1979 | 58,3 | 65,7 | 58,8 | 59,5 | 70,9 | 98,0 |
| 2009 | 91,7 | 73,4 | 71,2 | 82,6 | 86,5 | 80,0 |

Średnia krajowa współczynnika wykorzystania dla reaktorów typu BWR w Japonii wynosiła w 2009 roku 55,5%.

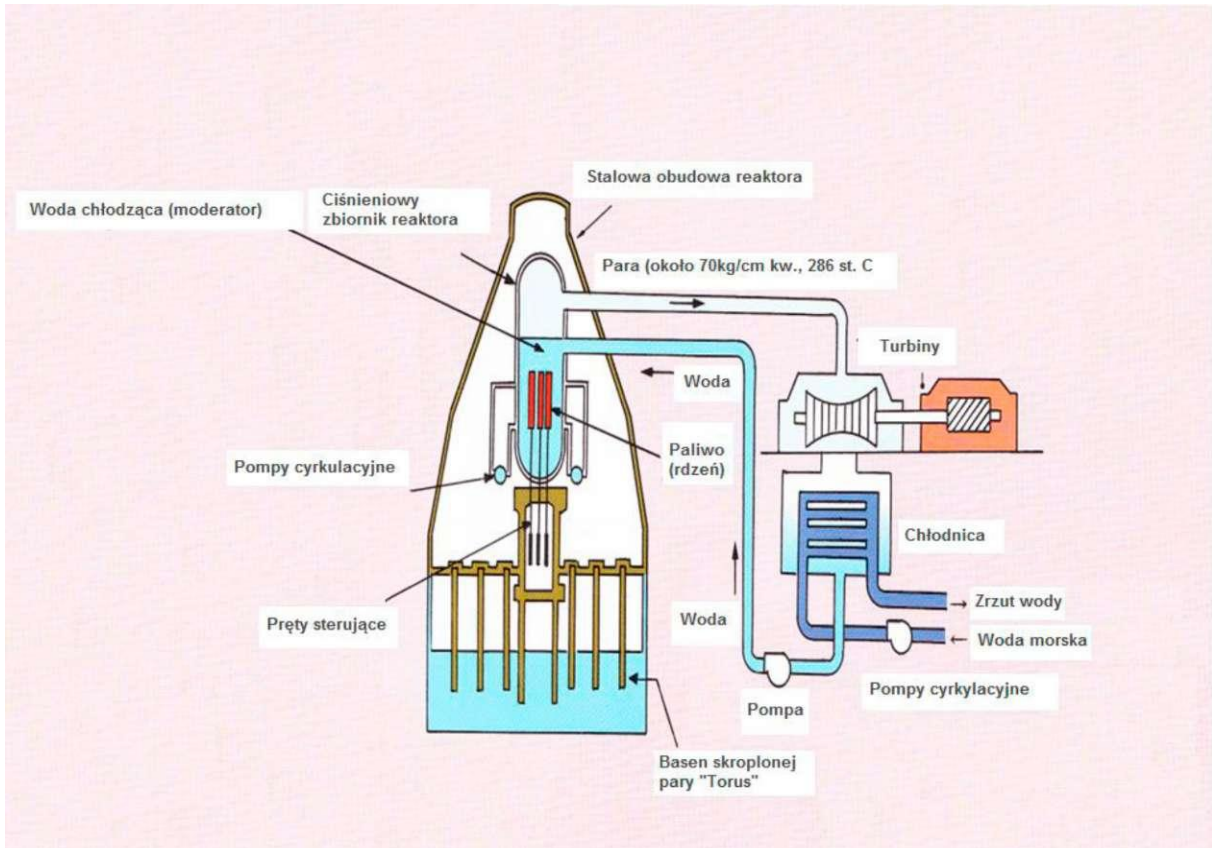
2.6. Zasady pracy reaktora BWR w elektrowni Fukushima Daiichi

Reaktory w elektrowni Fukushima Daiichi są reaktorami typu BWR (*Boiling Water Reactor*) tzw. Reaktory z Wrzącą Wodą. W Reaktorach z Wrzącą Wodą woda, która omywa zestawy paliwowe reaktora wrze i paruje. Para przepływa przez systemy osuszania umieszczone nad rdzeniem i jest doprowadzana do turbin, gdzie po wykonaniu pracy i skropleniu w skraplaczu (chłodnicy) powraca do reaktora. Jest to tzw. system jednobiegowy, który jest cechą charakterystyczną reaktorów typu BWR. Zaletą tego rozwiązania jest znaczne uproszczenie konstrukcji reaktora, np. nie ma konieczności stosowania wytwornic pary, a względnie niskie temperatury wewnątrz rdzenia oraz niskie ciśnienie pozwalają na zmniejszenie grubości stalowych ścian reaktora do 16 cm.

Temperatura pary nasyconej poruszająca turbinę wynosi około 280 C^0 , a jej ciśnienie około 7 MPa. Wadą tego typu rozwiązania jest konieczność budowy odpowiednio skonstruowanych turbin napędzanych parą zawierającą cząstki radioaktywne.

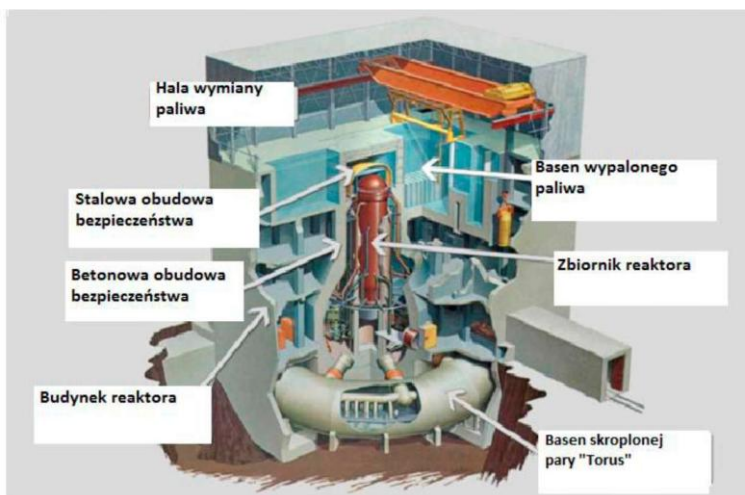
Budowa zestawów paliwowych jest podobna do budowy zestawów używanych w reaktorach ciśnieniowych tzn. w rurkach cyrkonowych stanowiących pręty paliwowe umieszczone są pastylki uranowe (walce o średnicy około 1 cm i długości również 1 cm). Zestaw prętów 7x7 (w nowszych konstrukcjach 9x9) stanowi zestaw paliwowy, tzw. kasetę. Kasety umieszczane są w rdzeniu, a ich ilość jest różna dla różnych rozwiązań reaktorów. Inną charakterystyczną cechą tych reaktorów jest wprowadzenie elementów sterujących w dolnej części rdzenia przy pomocy hydraulicznych. W przypadku awarii pręty regulacyjne SA wypychane do góry i blokowane automatycznie. W górnej części obudowy ponad kasetami umieszczone są elementy bezpieczeństwa – zraszacz dostarczający wodę w przypadku nagłego jej ubytku oraz elementy „uzdatniające” parę przed przesłaniem jej do turbiny tzw. separator i osuszacz po przejściu, przez które uzyskuje się parę nasyconą o wilgotności 0,3 - 0,5 %. Odseparowana woda powraca do obiegu wraz z dostarczaną wodą chłodzącą.

Woda chłodząca jest doprowadzana do kanałów chłodzących tzw. przestrzeni opadowej – przestrzeni pomiędzy ścianą obudowy bezpieczeństwa i wewnętrzną obudową rdzenia (kaset paliwowych). Po osiągnięciu dna jest kierowana do przestrzeni między kasetami gdzie zaczyna wrzeć. Obieg wody wymuszany jest przez zestaw pomp umieszczonych wewnątrz zbiornika.



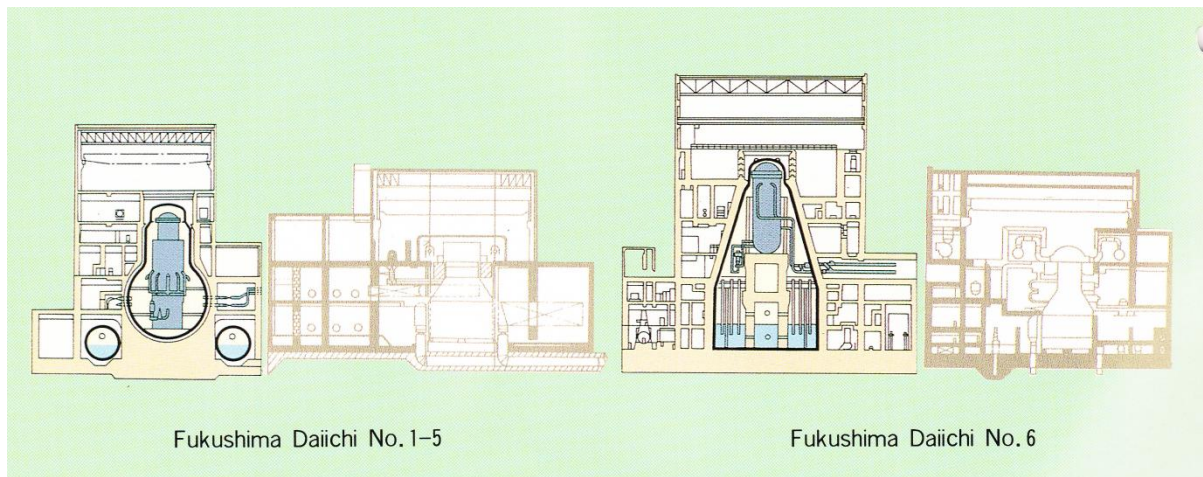
Rys.3 Schemat reaktora z wrzącą wodą

Basen skroplonej pary jest układem bezpieczeństwa reaktora. Przy zbyt dużym ciśnieniu przy wzroście temperatury rdzenia nadmiar pary jest odprowadzany do zbiornika w kształcie pierścienia (geometryczna nazwa torus), gdzie ulega skropleniu. Podczas normalnej pracy elektrowni reaktor jest przysłonięty od góry pokrywą uzupełniającą betonową obudowę bezpieczeństwa. Ściana obudowy jest wykonana ze specjalnie wzmacnianego betonu i ma grubość powyżej 1,5 m. W czasie wymiany paliwa zdejmowane są pokrywa betonowej osłony reaktora (składająca się z kilku części), oraz pokrywa stalowej obudowy bezpieczeństwa. Stalowa obudowa bezpieczeństwa jest na ten okres składowana w hali obok reaktora, a górna pokrywa zbiornika reaktora wraz elementami systemu osuszania pary jest składowana pod wodą w basenie pomocniczym.



Rys.4 Przekrój reaktora z wrzącą wodą

W blokach 1, 2, 3 w chwili trzęsienia w dniu 11 03 2011 ziemi zadziałały wszystkie urządzenia awaryjne i bloki zostały wyłączone. Blok 4 był wyłączony jeszcze przed trzęsieniem ziemi, a paliwo znajdowało się w basenie wypalonego paliwa. Dokonywano przeładunku paliwa. Jednakże wysoka fala tsunami uszkodziła systemy awaryjnego chłodzenia powodując przez to dalsze zniszczenia. Mimo to podobne usytuowanie bloków elektrowni Daiichi oraz bloków 5 i 6 w Daiichi, ale o bardziej nowoczesnych rozwiązaniach systemu chłodzenia nie spowodowało falę tsunami takich skutków awarii.



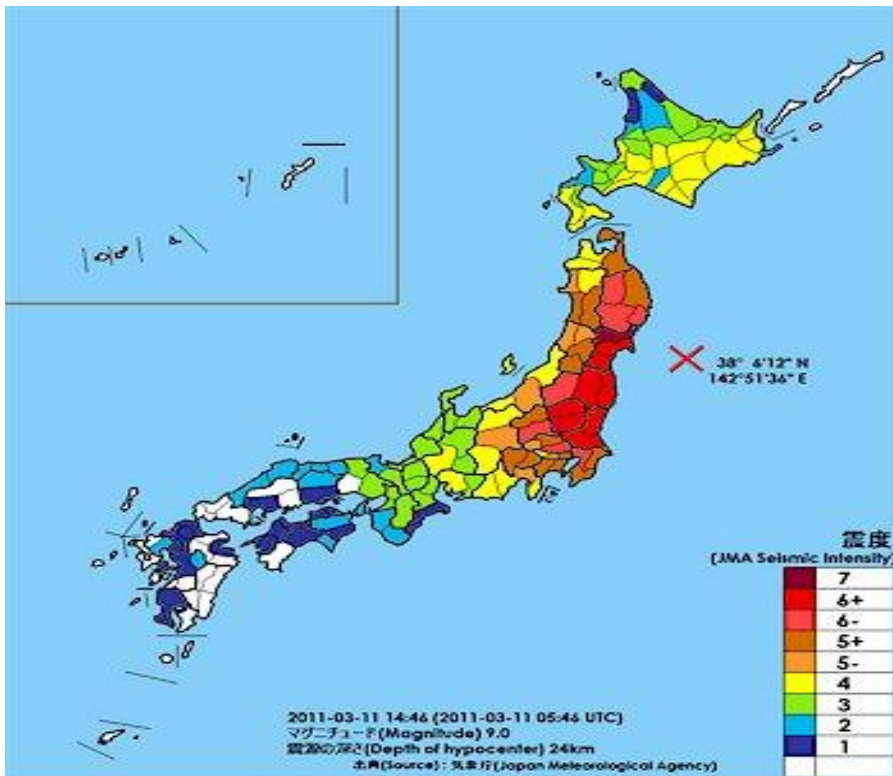
Rys. 5 Reaktory Mark I i Mark II

Na terenie elektrowni Daiichi projektowano w najbliższym czasie rozpoczęcie budowy dalszych bloków 7 i 8 z reaktorami ABWR (*Advanced Boiling Reactors*) - Zaawansowane Reaktory z Wrzącą Wodą tj. reaktory trzeciej generacji + (III+) o mocy 1 380 MW każdy. W następnych latach planowano zastąpić reaktory bloków 1, 2, 3, 4, reaktorami ABWR. Istniejąca już na terenie obecnego obiektu infrastruktura (magazyny odpadów, zakłady unieszkodliwiania odpadów, stacje wysokiego napięcia dołączone do sieci krajowej, doprowadzone linie przesyłowe, tymczasowe magazyny wypalone paliwa, zatwierdzona lokalizacja) pozwalało przypuszczać, że po opanowaniu sytuacji plany te mogą być realizowane. W kwietniu 2011 zrezygnowano z budowy nowych bloków 7 i 8.

3. Zasięg, przyczyny i przebieg awarii

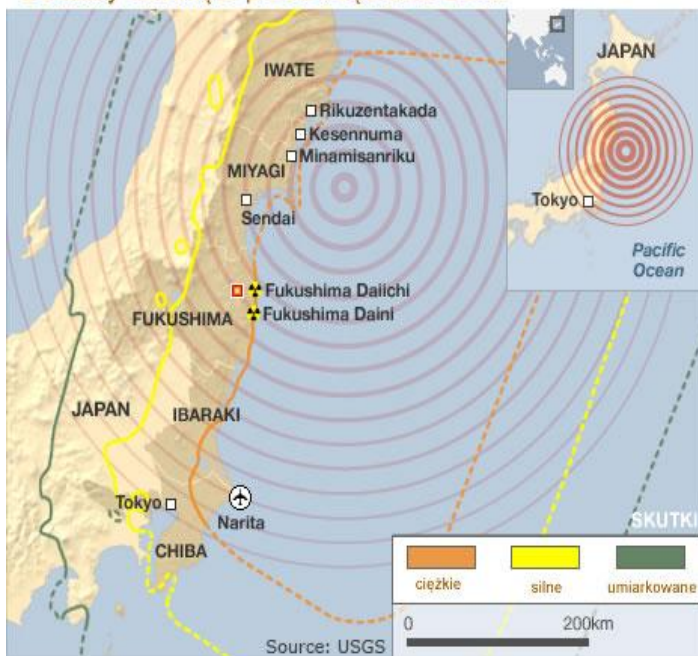
Rejon północno-wschodniej Japonii jest obszarem o dużej aktywności sejsmicznej, co było uwzględniane w projektach budowanych takiej elektrowni. Niecały miesiąc po katastrofie nastąpiły kolejne wstrząsy - 7 kwietnia 2011 o sile 7,4 w skali Richtera (epicentrum znajdowało się 64 km na wschód od Sendai na głębokości 25,6 km) i 21 kwietnia o sile 6,1 w skali Richtera (epicentrum 64 km na wschód od Sendai na głębokości 42,9 km), zaś w okresie 11-18 czerwca w tym rejonie zanotowano 6 trzęsień ziemi o sile około 5 w skali Richtera. Trzęsienia te nie spowodowały istotnych uszkodzeń elektrowni jądrowych.

Najbardziej narażonymi na falę tsunami z 11 marca 2011 były następujące elektrownie jądrowe: **Onagawa** (Bloki 1, 2, 3), **Fukushima I** (Bloki 1, 2, 3, 4, 5, 6), **Fukushima II** (Bloki 1, 2, 3, 4) oraz **Tokai II** (Blok 1). Docierająca do dalej położonych elektrowni **Hamaoki** i **Ikaty** fala tsunami wytraciła już swoją energię i nie spowodowała zniszczeń. Wszystkie reaktory w chwili trzęsienia ziemi zostały wyłączone automatycznie.

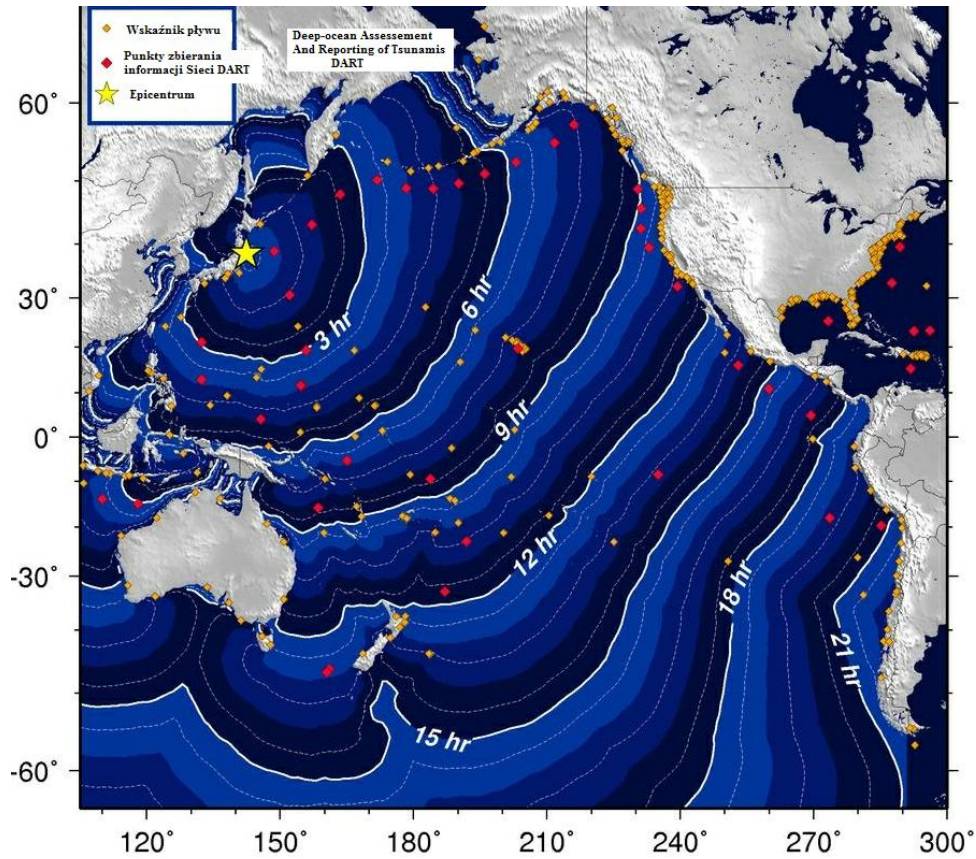


Rys. 6 Intensywność wstrząsów sejsmicznych w czasie trzęsienia ziemi 11 marca 2011. Trzęsienie ziemi 11 marca było tak silne, że zmieniło oś obrotu Ziemi (o 10 cm – dzień uległ skróceniu o 1,6 μ s), a cała Japonia została przesunięta o około 2.4 m. Było ono poprzedzone 9 marca wstrząsami o sile 7,2 w skali Richtera

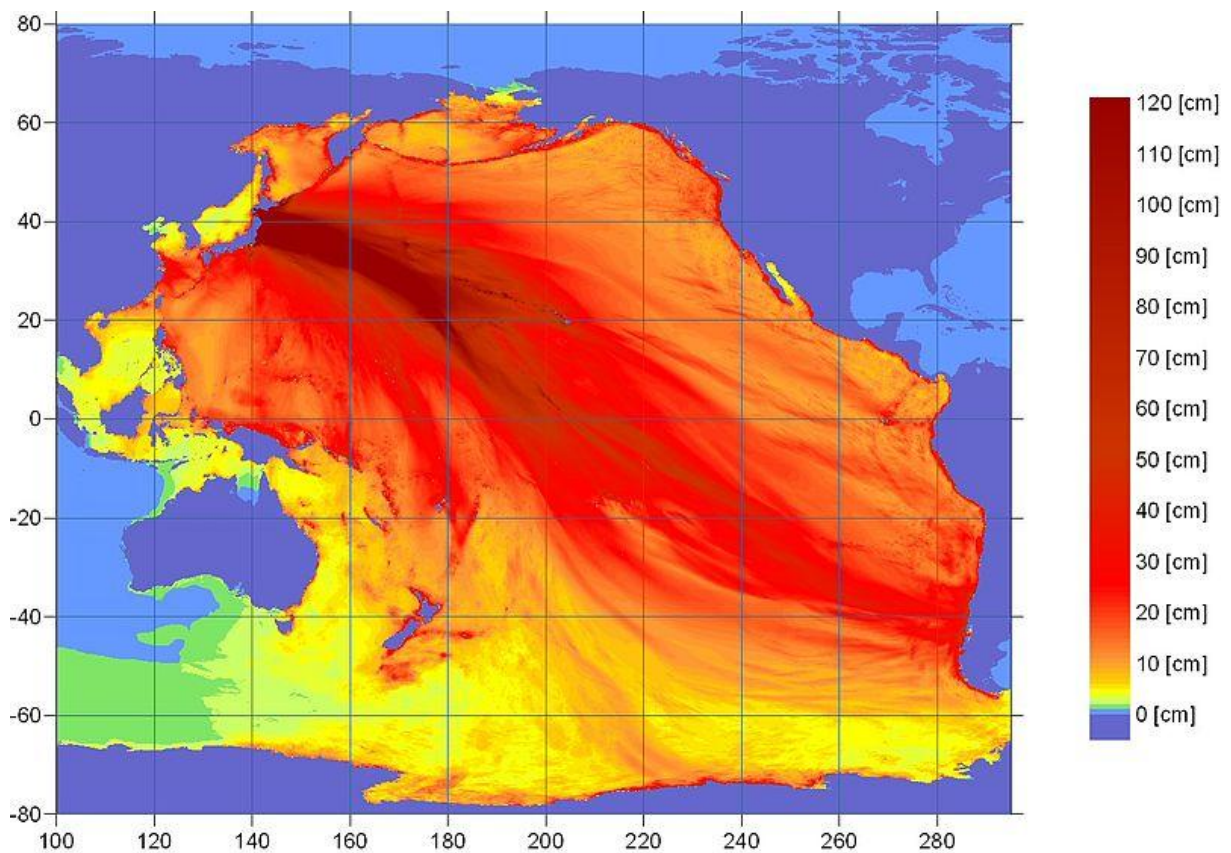
Obszary dotknięte przez trzęsienie ziemi



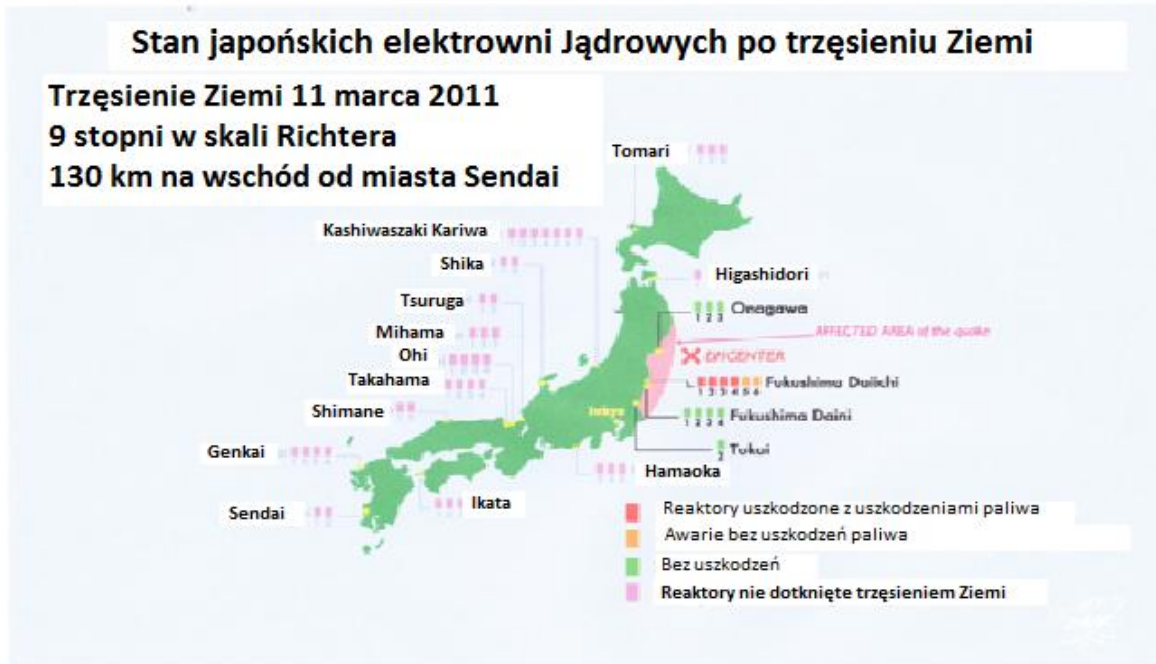
Rys. 7 Obszary dotknięte trzęsieniem ziemi



Rys. 8 Szybkość rozchodzenia się fali tsunami



Rys. 9 Wysokość fali tsunami na Oceanie Spokojnym



Źródło JAIF

Rys.10 Stan japońskich elektrowni jądrowych po trzęsieniu ziemi 11 marca 2011

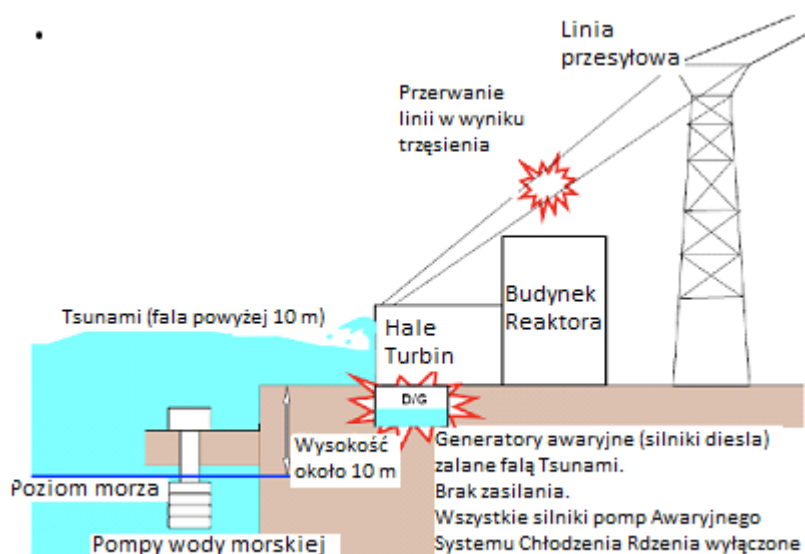
Problem odporności wszelkich budowli budynków, mostów, wiaduktów, kolei podziemnych itp. jest zawsze uwzględniany przy projektowaniu nowych obiektów niezależnie od tego czy w danym regionie gdzie ma powstać budowla przewidywane są trzęsienia ziemi czy nie. Mogą zawsze wystąpić jakieś lokalne wstrząsy tektoniczne. Problem ten jest szczególnie istotny w rejonach, w których jest wysokie prawdopodobieństwo wystąpienia trzęsień. Niezwykle ważnym zagadnieniem jest przyjęcie założeń określających wytrzymałość konstrukcji. Powszechnie używaną skalą określającą wielkość trzęsienia ziemi na podstawie amplitudy drgań wstrząsów sejsmicznych jest skala **Richtera**, wprowadzona w 1935. Obecnie używana wyłącznie przez dziennikarzy, z powodu przyzwyczajenia odbiorców i mass mediów.

Stosowana jest też skala Mercallego (skala Mercallego-Cancaniego-Sieberga, skala MCS), w której intensywność wstrząsu określana jest na podstawie wartości przyspieszenia drgań gruntu i opisie skutków trzęsienia.

W Japonii wprowadzona skalę siedmiostopniową skalę Shindo (jej początki sięgają XIX wieku - era Meiji) zbliżoną obecnie do skali Mercallego. Do celów projektowych używana jest jednostka Gal - Galileo określająca tzw szczytowe przyspieszenie na powierzchni ziemi (*Peak Ground Acceleration -PGA*) zdefiniowana jako $Gal = 0,01m/s^2$ Przyspieszenie ziemskie $g = 980 m/s^2$ tzn. $1g = 980 Gali$ (na równiku $1g = 978 Gali$, na biegunie $1g = 983 Gali$) lub 1. Wytrzymałość bloku 1 elektrowni Fukushima była zaprojektowany na 176,4 Gali czyli $\sim 180 Gali$ (0,18g). Czyli $1\%g = 9,8 Gala$ a więc w przybliżeniu można przyjąć, że $1\%g = 10 Gali$. Pozostałe bloki miały wytrzymać $450 Gali$ (0,45g). **Stacje sejsmiczne w pobliżu Fukushima zarejestrowały od 300 do 600 Gali** (0,30g do 0.60g). Wymagania EUR (*European Utility Requirements*) to 250 gali (0,25g), reaktory EPR i AP1000 są obliczane powyżej 300 Gali (0,30g). Obliczeniowe wymagania japońskie to 400 Gali (0,40g).

Elektrownie jądrowe narażone na fale tsunami dnia 11 03 2011

| Bloki | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--------------|-----------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------|
| Onagawa | Moc [MW]/ Data Włączenie do sieci | 524 1984 | 825 1995 | 825 2002 | | | |
| Fukushima I | Moc [MW]/Włączenie do sieci | 460 1971 | 784 1974 | 784 1976 | 784 1978 | 784 1978 | 1100 1979 |
| Fukushima II | Moc [MW]/Włączenie do sieci | 1100 1982 | 1100 1984 | 1100 1985 | 1100 1987 | | |
| Tokai II | Moc [MW]/Włączenie do sieci | 1100 1978 | | | | | |



Prezentacja Tatsujiro Suzuki (May 2-4 2011) Re-Engineering of Nuclear Engineering Shuichi IWATA Poland Pultusk 08 June 2011

Rys. 11 Przyczyny awarii reaktorów w Fukushima Daiichi





Rys. 12 Zniszczenia sieci elektrycznej (prezentacja Naoki Anahara TEPCO)



Rys. 13 Obszar elektrowni Fikushima Daiichi zalany falą tsunami (prezentacja Naoki Anahara TEPCO)

3.1. Bezpośrednie skutki awarii

Przed wystąpieniem wstrząsów Bloki 1, 2, 3 elektrowni Fukushima I pracowały prawidłowo, zaś Bloki 4, 5, 6 elektrowni były wyłączone, a paliwo jądrowe z reaktora 4 (Blok 4) znajdowało się w basenie wypalonego paliwa. Po wystąpieniu wstrząsów nastąpiło automatyczne wyłączenie Bloków 1, 2, i 3, a systemy awaryjne zostały uruchomione i pracowały prawidłowo. Można, więc uznać, że trzęsienie ziemi jako takie nie spowodowało na terenie elektrowni istotnych uszkodzeń. W wyniku trzęsienia ziemi zostały uszkodzone cztery niezależne linie energetyczne (500 kV linie Futaba, dwie linie 275 kV Okuma i linie Yonomori) łączące elektrownię Fukushima Daichi z podstacją Shin -Fukushima dołączoną do sieci krajowej. Z podstacją Shin Fukushima połączona była też elektrownia Fukushima Daini. Jednak najbardziej istotnym skutkiem trzęsienia ziemi było wywołane przez falę tsunami uszkodzenie awaryjnych systemów zasilania, co spowodowało unieruchomienie systemów awaryjnego chłodzenia kilku bloków energetycznych. Doprowadziło to w wyniku przegrzania do uszkodzenia rdzeni reaktorów. Nastąpiło również uszkodzenie jednego z basenów wypalonego paliwa znajdujących się w pobliżu reaktorów. Ponadto w wyniku eksplozji wodoru (H₂) uszkodzone zostały budynki reaktorów i nadal nie jest jasne, czy nie zostały uszkodzone obudowy bezpieczeństwa. Nastąpiło częściowe stopienie rdzeni reaktorów. Pojawiły się liczne wycieki substancji radioaktywnych, m.in. nastąpiło uwolnienie do środowiska (atmosfery i wody morskiej) jodu (J¹³¹) (około 1/10 ilości uwolnionej w katastrofie w Czarnobylu). Na terenie elektrowni zanotowano wzrost poziomu promieniowania. Zarządzono szeroką akcją ewakuacyjną ludności z zagrożonych skażeniem radioaktywnym obszarów.

3.2. Przebieg wydarzeń

Tabela 9

Przebieg wydarzeń w elektrowni Fukushima Daiichi i okolicy bezpośrednio po trzęsieniu ziemi

Przebieg wydarzeń w elektrowni Fukushima Daiichi i okolicy bezpośrednio po trzęsieniu ziemi

| Data Wydarzenie | Przebieg awarii | Zagrożenie | Działania |
|--------------------------------------|--|---|---|
| 11 03 2011/14:43 Trzęsienie ziemi | - Zerwania połączenia z energetyczną siecią krajową i siecią komunikacyjną - Automatyczne wyłączenie reaktorów - Uruchomienie agregatów awaryjnego zasilania | Utrata możliwości pracy urządzeń awaryjnych | Powiadomienie władz rządowych i właściciela elektrowni TEPCO |
| 11 03 2011/15:41 Fala tsunami | - Zniszczenie agregatów awaryjnego zasilania -uruchomienie zasilania akumulatorowego (max. 8 godz pracy) - wyłączenie aparatury kontrolno pomiarowej - zniszczenie pompowni wody chłodzącej (Wzrost temperatury wody, wzrost ciśnienia, parowanie wody, otwarcie zaworów bezpieczeństwa pary, wzrost ciśnienia w obudowach bezpieczeństwa, gromadzenie się wodoru nad obudową pierwozną, obniżenie poziomu wody chłodzącej) Zwiększenie poziomu promieniowania w okolicy elektrowni. -Zniszczenie dróg komunikacyjnych w elektrowni | Możliwość reakcji cyrkonu koszulek prętów paliwowych (Emisja wodoru) Możliwość niekontrolowanego topienia rdzeni Zagrożenie rozprzestrzeniania skażeń | Sprawdzenie zapasowych akumulatorów z innych elektrowni Kontrolowane wypuszczenie pary w celu obniżenia ciśnienia. Ewakuacja ludności ze strefy o promieniu do 2 km |
| 12 03 2011 | - Wzrost ciśnienia w reaktorze 1 - 15:36 Wybuch wodoru reaktor 1 - Awaria systemów chłodzenia | Zagrożenie rozprzestrzeniania skażeń | Rozszerzenie strefy ewakuacji do 10 km 14:30 Kontrolowane wypuszczenie pary w celu obniżenia ciśnienia. Stopień zagrożenia wynosi 4 w skali INES (reaktor 1).Rozszerzenie strefy ewakuacji do 20 km 20:20 rozpoczęto wtlaczanie wody morskiej do systemów chłodzenia (reaktor 1) |
| 13 03 2011 | | | Kontrolowane wypuszczenie pary w celu obniżenia ciśnienia. Reaktor3 |
| 14 03 2011 | - 11:01 Wybuch wodoru reaktor 3 (3 osoby ranne, 7 zaginionych) - Awaria systemu chłodzenia (reaktor2). Odsłonięcie prętów paliwowych -23:54 Pożar w pobliżu basenu wypalonego paliwa (reaktor 4) | Poziom promieniowania na terenie elektrowni 751,2µSv/h Zagrożenie rozprzestrzeniania skażeń | Rozpoczęto wtlaczanie wody morskiej do systemów chłodzenia (reaktory 1, 2, 3) Ewakuowano 185 000 osób Dostarczenie nowych agregatów dieslowskich |
| 15 03 2011 | -pożar w pobliżu basenu wypalonego paliwa (reaktor 4). Prawdopodobny wybuch wodoru | Zagrożenie rozprzestrzeniania skażeń | Ewakuacja personelu elektrowni Zalecenie nie opuszczania zamkniętych pomieszczeń przez |

| | | | |
|------------|--|--|--|
| | - Poziom promieniowania na terenie elektrowni - przy bramie 11 930 $\mu\text{Sv/h}$ - poblizu reaktora 3 (paliwo MOX) 400 000 $\mu\text{Sv/h}$, - poblizu reaktora 4 100 000 $\mu\text{Sv/h}$ | | ludność zamieszkała w promieniu 20-30 km. Zakaz lotów w promieniu 30 km Próby odtworzenia połączeń z energetyczną siecią krajową |
| 16 03 2011 | - Pożary w reaktorach 3 i 4 - Wzrost poziomu promieniowania na terenie elektrowni - przy bramie 6 400 $\mu\text{Sv/h}$ | | Nieprowadzenie zrzutu wody ze śmigłowców do basenu wypalonego paliwa (reaktor 3 poziom promieniowania 50 000 $\mu\text{Sv/h}$) Budowa drogi dojazdowej do reaktora 4 |
| 17 03 2011 | - Poziom promieniowania w poblizu reaktora 3 400 000 $\mu\text{Sv/h}$ - Zaobserwowano obniżanie się poziomu promieniowania | | Zrzut wody ze śmigłowców i użycie armatek wodnych Straży Pożarnej do chłodzenia (reaktor 3) |
| 18 03 2011 | - Zaobserwowano obniżanie się poziomu promieniowania | | Kontynuacja zrzutu wody ze śmigłowców i użycie armatek wodnych Straży Pożarnej do chłodzenia reaktorów - Usuwanie zniszczeń na drogach komunikacyjnych na terenie elektrowni |
| 19 03 2011 | - Powolna stabilizacja stanu reaktorów | | Kontynuacja chłodzenia reaktorów przez wpompowywanie wody do obiegów chłodzeni Kontynuacja pompowania wody do reaktorów Kontynuacja prac nad doprowadzeniem zasilania Przywrócenie zasilania generatorów dieslowskich uruchomienie systemów chłodzenia. Wykonanie otworów przeciwdziałających gromadzeniu się wodoru. |
| 20 03 2011 | - Powolna stabilizacja stanu reaktorów | | Pompowanie wody morskiej do (40 t) do basenu wypalonego paliwa reaktor 2 i uzupełnianie wody w basenach wypalonego paliwa reaktory 3 i 4 |
| 21 03 2011 | - Powolna stabilizacja stanu reaktorów | | Pompowanie wody morskiej do (40 t) do basenu wypalonego paliwa reaktor 2 i 1 |
| 22 03 2011 | - Powolna stabilizacja stanu reaktorów | | Podłączenie zasilania do wszystkich reaktorów. Uruchomienie systemów chłodzenia nie powiodło się Kontynuacja użycia armatek wodnych Straży Pożarnej do chłodzenia reaktorów |
| 23 03 2011 | - Powolna stabilizacja stanu reaktorów | Poziom promieniowania na terenie elektrowni 256,1 $\mu\text{Sv/h}$ | Przyłączenie elektrowni do krajowej sieci energetycznej |
| 24 03 2011 | - Powolna stabilizacja stanu reaktorów | | Uruchomienie oświetlenia sterowni (reaktor 1) |
| 25 03 2011 | - Powolna stabilizacja stanu reaktorów | | Uruchomienie systemu podawania słodkiej wody do |

| | | | |
|------------|--|--|--|
| | | | systemów chłodzenia reaktorów 1 i 3 a następnie 2. Zalecenie dobrowolnej ewakuacji w promieniu 20 -30 km. |
| 27 03 2011 | - Powolna stabilizacja stanu reaktorów | Lokalne silne skażenia na terenie elektrowni (skażenie wodą z zanieczyszczeniami radioaktywnymi) w poblizu Bloku 2 poziom promieniowania wynosił Sv/h Dym z Bloków 1, 2, 3, 4 | Lokalizacja skażeń i przygotowywanie ciągów komunikacyjnych |
| 27 03 2011 | - Powolna stabilizacja stanu reaktorów | Silne Skażenie w kanałach technicznych Bloku 2 poziom promieniowania wynosił Sv/h | Lokalizacja skażeń i przygotowywanie ciągów komunikacyjnych |
| 29 03 2011 | - Powolna stabilizacja stanu reaktorów | | Przywrócenie zasilania w sterowni bloku 4 |
| 02 04 2011 | - Powolna stabilizacja stanu reaktorów | Zanieczyszczenie akwenów przybrzeżnych wodą z elektrowni | Próby usuwania elektrowni wody ze zanieczyszczeniami radioaktywnymi) Zrzut wody do oceanu |
| 09 04 2011 | - Powolna stabilizacja stanu reaktorów | Zanieczyszczenie akwenów przybrzeżnych wodą z elektrowni | Budowa zbiorników na elektrowni wodę z zanieczyszczeniami radioaktywnymi |
| 12 04 2011 | - Powolna stabilizacja stanu reaktorów | | Zmiana klasyfikacji skali zagrożenia wg skali INIS dla Bloków 1, 2, 3 do stopnia 7 |
| 22 04 2011 | - Powolna stabilizacja stanu reaktorów | | Przedstawienie wstępnego planu usuwania skutków awarii Zaobserwowano spadek temperatury w zagrożonych rejonach. |
| 05 05 2011 | - Powolna stabilizacja stanu reaktorów | | Możliwe wejście do budynków reaktorów |
| 03 06 2011 | - Powolna stabilizacja stanu reaktorów | Lokalne silne skażenia na terenie Bloku 1 4 Sv/h | Użycie robotów do prac pomiarowych i usuwania zniszczeń |
| 01 08 2011 | - Stabilizacja stanu reaktorów | Lokalne silne skażenia na terenie elektrowni Bloki 1,2 2-5 Sv/h | |
| 16 08 2011 | - Stabilizacja stanu reaktorów | | Zaobserwowano spadek temperatury w zagrożonych rejonach. |
| 16 12 2011 | - Stabilizacja stanu reaktorów | | Uzyskanie temperatury zimnego wyłączenia |

3.3. Podsumowanie

W wyniku trzęsienia ziemi nastąpiło:

- automatyczne wyłączenie reaktorów, wsunięcie prętów regulacyjnych, zatrzymanie reakcji łańcuchowej
- uruchomienie systemu chłodzenia awaryjnego do uzyskania stanu zimnego wyłączenia tzn. uzyskania stanu, gdy ciepło po wyłączeniu stanowi 3% ciepła w normalnych warunkach pracy reaktora.
- przerwanie połączeń z krajową siecią energetyczną i utratę łączności

- uruchomienie generatorów awaryjnych (dieslowskich) do zasilania systemu chłodzenia awaryjnego
 - spodziewanej zniszczenie generatorów awaryjnych przez falę tsunami wyższą od spodziewanej
 - włączenie przez operatora elektrowni zasilania akumulatorowego zapewniające zasilanie przez 8 godz.
 - zastosowanie przez operatora nieprawidłowych procedur postępowania i procedur postępowania w przypadkach awaryjnych
- Uszkodzenia będące następstwem trzęsienia ziemi i fali tsunami spowodowały:
- niemożność szybkiego przywrócenia zasilania i opóźnienie w dostawy przewodzących generatorów prądowych
 - wyładowanie akumulatorów i w konsekwencji przerwanie procesu chłodzenia
 - podniesienie temperatury w reaktorze powyżej 1000 C⁰ co wywołało reakcję chemiczną koszułek cyrkonowych z wodą ($Zr + 2 H_2O = Zr O_2 + 2 H_2 + \text{ciepło}$) uwalniając wodór do obudowy reaktora, który nie mógł być rekombinowany ze względu na brak zasilania, co spowodowało późniejszy wybuch. Obawiano się również samoistnego wystąpienia stanu krytycznego (*Criticality accident*) prowadzącego do niekontrolowanego wzrostu mocy i temperatury w rdzeniu. (Stan krytyczny w reaktorze nie prowadzi do wybuchu jądrowego). W początkowej fazie awaryjnych prób chłodzenia do wody morskiej w pobliżu elektrowni przedostały się substancje radioaktywne. Substancje radioaktywne przedostały się również do atmosfery powodując skażenie terenu w pobliżu elektrowni

4. Analiza bezpośrednich skutków awarii

Przeprowadzenie dokładnej analizy skutków awarii i ustaleniu pełnego ich zakresu będzie procesem długotrwałym dotyczącym nie tylko problemów technicznych, ale i oceny jej wpływu na ludzi i środowisko. Analizy prowadzone obecnie przez liczne zespoły ekspertów w wielu krajach w oparciu o dostępne obecnie materiały mają charakter analiz pomocniczych i są w większości oparte wyłącznie o symulacje komputerowe..

Pierwszą wstępną analizę, opublikowaną 9 maja 2011, pt. „Wnioski wyływające z analizy awarii w elektrowni jądrowej Fukushima Daiichi “ (*Lessons learned from the accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant*) przeprowadził zespół ekspertów z OASIS (*Open Standartrs for the Information Society-Otwarte Standardy Informacji Społecznej*, Podkomisja Analiz Technicznych), CINS (*Committee for Investigation of Nuclear Safety – Komitet Badań Bezpieczeństwa Jądrowego*) oraz AESJ (*Atomic Energy Society of Japan – Japońskie Towarzystwo Energii Atomowej*). W raporcie analizowano znane przyczyny awarii, uwzględniając rozwiązania techniczne, takie jak odporność na falę tsunami, brak zasilania, chłodzenie awaryjne, zarządzanie kryzysowe, wybuch wodoru, zabezpieczenie basenów wypalonego paliwa, badanie bezpieczeństwa, procedury bezpieczeństwa organizacja systemu kryzysowego, informowanie społeczeństwa, procedury bezpieczeństwa w czasie alarmu.

Analizując poszczególne zagadnienia ustalono przede wszystkim, że założenia techniczne elektrowni nie uwzględniały możliwości wystąpienia tak wysokiej fali tsunami. Statystyka ze 140 ostatnich lat nie wskazywała na prawdopodobieństwo wystąpienia fali takich rozmiarów, a budowa elektrowni na wysokości 10 m nad poziomem morza wydawała się być bezpieczna. Założenia projektowe przewidywały falę około 6,5 m Wysokość ta odpowiada mniej więcej trzem piętrům, podczas gdy fala w/g niektórych szacunków przekraczała 14 - 15 m (tj. prawie 5 pięter). Fala zniszczyła urządzenia awaryjne, co z kolei wywołało dalsze zniszczenia. Długotrwały brak zasilania uniemożliwił m.in. monitorowanie stanu reaktora i utrudniał zarządzanie kryzysowe. Ustalono również, że system chłodzenia

elektrowni wykorzystujący wodę morską nie był odpowiednio zabezpieczony przed tsunami. Nie przewidziano też możliwości wydostania się wodoru z obudowy bezpieczeństwa oraz jego wybuchu. Nie było też dostatecznego odseparowania materiałów radioaktywnych w basenie wypalonego paliwa na wypadek uszkodzenia budynku reaktora. System zasilania awaryjnego uznano za niewystarczający, podobnie jak japońskie procedury bezpieczeństwa. Politykę informowania społeczeństwa określono, jako nieprzejrzystą. Uznano natomiast, że decyzje podejmowane przez zespół zarządzania kryzysowego znacząco przyczyniły się do ograniczenia skali awarii. Jako skuteczne określono też większość rozwiązań technicznych zapobiegających zniszczeniom w wynikającym z trzęsienia ziemi jako takiego.

Wobec tego eksperci zalecają:

- opracowanie i rozbudowę systemów zabezpieczeń fizycznych i struktur organizacyjnych systemu bezpieczeństwa w zakresie elementów chroniących przed skutkami tsunami

- przygotowanie alternatywnych, różnorodnych źródła zasilania, np. chłodzonych powietrzem turbin gazowych

- rozważenie możliwości stosowania zróżnicowanych systemów chłodzenia wspomagających chłodzenie wodą morską (jest to bardzo istotny wniosek ze względu na to, że wszystkie pracujące i planowane w Japonii elektrownie budowane są na wybrzeżu i wykorzystują do chłodzenia wodę morską)

- przeprowadzenie ilościowej analizy ryzyka wystąpienia awarii i wprowadzenie pojęcia ryzyka do procedur bezpieczeństwa.

- zakładając możliwość występowania poważnych awarii, należy opracować nowy dokładny system zarządzania kryzysowego przygotowany tak, by jego elementy fizyczne (linie przesyłowe, komunikacyjne, systemy monitorowania) były dublowane. Konieczne jest jednocześnie zwrócenie uwagi na odpowiednie przygotowanie personelu przez ćwiczenia i edukację. Szczególną uwagę przy opracowywaniu tego systemu należy poświęcić możliwości wybuchu wodoru i ochronie basenów wypalonego paliwa. Konieczna jest restrukturyzacja procedur bezpieczeństwa, włączając w to zmianę regulacji prawnych oraz reorganizacja systemu.

- wprowadzenie przejrzystego systemu komunikacji społecznej.

Zakładając, że może się wydarzyć poważna awaria należy tak zaprojektować nowy system bezpieczeństwa by jego zabezpieczenia znacznie przewyższały spodziewane skutki.

Po przeprowadzenie pełnej analizy skutków i mechanizmów awarii w Fukushima możliwe będzie udoskonalenie systemu bezpieczeństwa. Oczywiście wszystkie zalecenia należy realizować etapowo poczynając od najpilniejszych (krótko terminowych) realizowanych w ciągu roku, i wymagających większych reform wprowadzanych w ciągu 2-3 lat. Efektem przebudowy systemu bezpieczeństwa jądrowego w Japonii powinna być jego większa skuteczność, przejrzystość i usunięcie istniejących obecnie przeszkód biurokratycznych. Powyższe analizy i propozycje zmian przedstawiono w bardzo skróconej formie, ponieważ pełne zalecenia dotyczące zmian np. krótko terminowych są bardzo szczegółowe i odnoszą się do rozwiązań technicznych

Kolejne wyniki badań skutków awarii, przygotowane przez zespoły międzynarodowe, przedstawiono w czasie pięciodniowej (20 -25 czerwiec 2011) konferencji organizowanej w Wiedniu przez MAEA, oraz podobnej konferencji organizowanej przez OECD . W czasie tych spotkań przedstawiono również raport rządu Japonii (*Report of Japanese Government to the IAEA Ministerial Conference on Nuclear Safety- The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations*). Zadaniem konferencji było również ponowne rozpatrzenie i wypracowanie międzynarodowych standardów bezpieczeństwa jądrowego, oraz wzmocnienie roli MAEA w ich realizacji.

Raporty cząstkowe analizujące poszczególne fazy katastrofy są przygotowywane systematycznie w ciągu całego roku. W jednym z ostatnich opublikowanym w grudniu 2011 stwierdzono m.in., że 10 m fala tsunami mogłaby zostać powstrzymana, gdyby wprowadzono wcześniejsze zalecenia ekspertów, jak również, że po utracie zasilania operator (pracownicy elektrowni) nie wprowadził przewidywanych procedur awaryjnych dla systemów chłodzenia reaktorów 1 i 3. Raport stwierdza, że gdyby uruchomiono wcześniej wozy straży pożarnej do schładzania (pompowania wody), zniszczenia byłyby ograniczone i mniej substancji radioaktywnych przedostałoby się do atmosfery. Działania Rządu oceniono, jako niedostateczne, szczególnie brak łączności pomiędzy Rządem a centrum kryzysowym zawiadującym tzw. systemem SPEEDI (*System for Predicting Environmental Emergency Dose Information*), którego zadaniem jest między innymi prognozowanie rozprzestrzenianiem się substancji radioaktywnych. Dane z systemu, SPEEDI nie były wykorzystywane w rozporządzeniach o ewakuacji, które były niedokładne i nie docierały do władz lokalnych. Podobnie nieprzejrzysty był system informowania społeczeństwa.

4.1. Skażenie radioaktywne

Przed omówieniem problemów związanych ze skażeniem środowiska i narażeniem ludności w czasie i po awarii w elektrowni warto jest przypomnieć kilka istotnych zagadnień związanych z promieniowaniem.

Zanieczyszczeniem lub skażeniem środowiska nazywany stan powstały w wyniku pojawienia się w powietrzu, w wodzie lub w glebie, różnych substancji w ilościach i składzie odbiegających od stanu naturalnego i wpływających ujemnie na zdrowie człowieka, przyrodę, klimat lub glebę.

Skażenie promieniotwórcze polega znacznym podniesieniu aktywności promieniotwórczej powyżej jej naturalnego poziomu. Odnosi to się zarówno do ludzi, przedmiotów jak i środowiska. Aktywność promieniotwórcza jest wielkością fizyczną określającą natężenie promieniowania przez szybkości rozpadu promieniotwórczego jąder atomowych w jednostce czasu tzn. określającą liczbę rozpadających się izotopów w określonym czasie. Jednostką aktywności jest bekerel, Bq: **1 Bq = 1 rozpad/1 s**

Promieniotwórczość naturalna (promieniowanie naturalne) - pochodzi z naturalnych pierwiastków radioaktywnych obecnych w glebie, skałach, powietrzu i wodzie. Naturalne promieniowanie jonizujące jest obecne w minerałach, przyswajanych przez rośliny i zwierzęta i pośrednio przez ludzi. Jest obecne w powietrzu, ciekach wodnych, oceanach w glebie. Źródeł tego promieniowania nie da się uniknąć. Np. przeciętna całkowita aktywnością promieniotwórcza ciała człowieka wynosi przy wadze 80 kg 8000 Bq (ok. 100 -140 Bq/kg), aktywność 1 Litra mleka 50 Bq, wody morskiej 12 Bq/l.

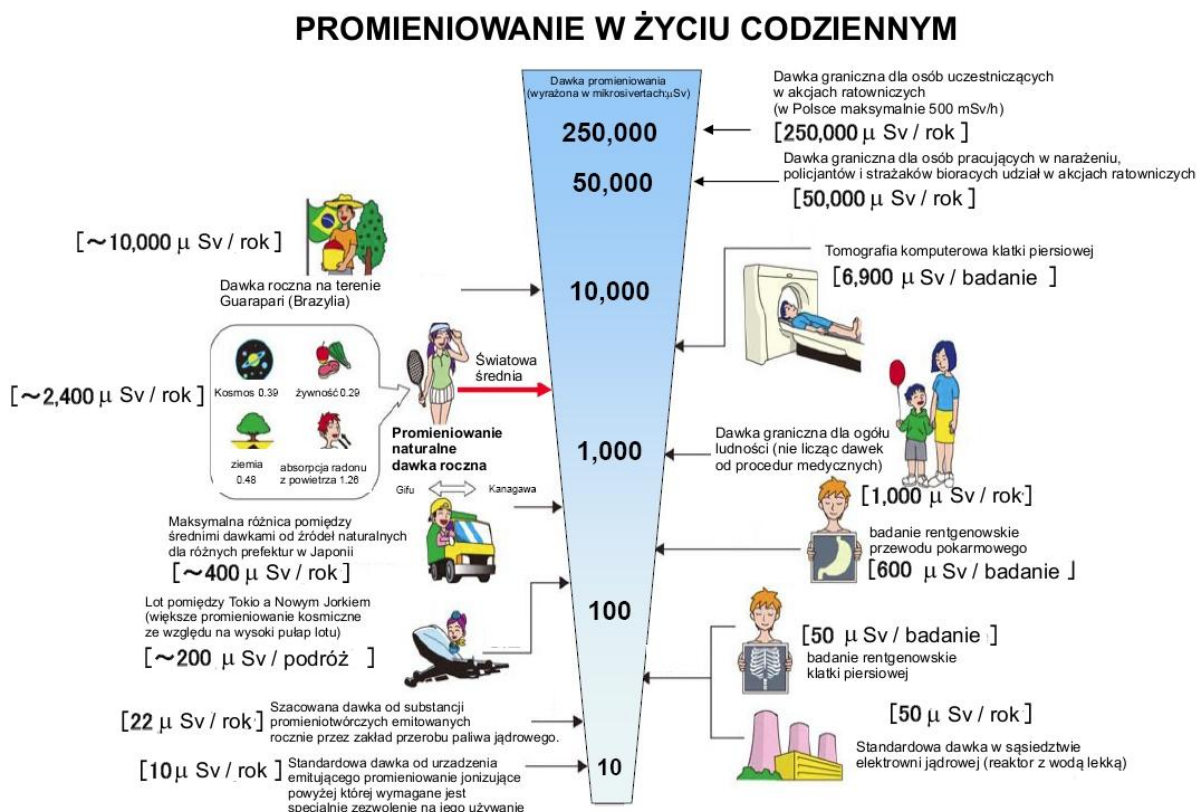
Oddziaływanie promieniowania na tkankę organizmów żywych lub inną materię badane jest za pomocą dawki określonej, jako ilość energii pochłoniętej przez każdy kilogram napromieniowywanej materii. Obecnie obowiązującą jednostką (uwzględniającą rodzaj promieniowania) jest Siwert definiowany, jako ilość energii 1 J (dżula) przez 1 kg materii tzn. $1\text{Sv} = \text{J/kg} \cdot [\text{m}^2/\text{s}^2]$. Nazwa jednostki pochodzi od nazwiska Rolfa Maximiliana Sieverta szwedzkiego fizyka, medyka, który wniósł znaczący wkład w badania nad biologicznymi skutkami promieniowania założyciela Międzynarodowego Stowarzyszenia Ochrony przed Promieniowaniem(IRPA).

Wartość dawki pozwala oszacować biologiczne skutki oddziaływania promieniowania na funkcjonowanie organizmów i porównywać z wartością dawki granicznej określonej, jako suma narażeń wewnętrznych i zewnętrznych w okresie 1 roku. Wartość dawki granicznej,

której nie powinno się przekroczyć została wyznaczona na podstawie wieloletnich badań wpływu promieniowania uwzględniając, źródła promieniowania, narażenie osób, oddziaływanie promieniowania na określone tkanki i narządy. Wartość graniczna jest podana w przepisach bezpieczeństwa. Na rys.13 przedstawiono dawki graniczne dla różnych codziennych sytuacji.

Dawka graniczna dla osób zawodowo narażonych na promieniowanie wynosi 20 mSv/rok (20000 μ Sv/rok), podobny limit dla ogółu ludności wynosi 1mSv/rok (1000 μ Sv/rok). Podane limity nie obejmują dawek otrzymywanych przez oddziaływanie promieniowania naturalnego charakterystycznego dla danego miejsca i zabiegów terapeutycznych. Średnia roczna dawka pochodząca z promieniowania naturalnego w Polsce wynosi 2,6 mSv (2 600 μ Sv). Należy podkreślić, że dawka roczna jest dawką zsumowaną tzn. np. 20 mSv w ciągu roku jest sumą narażeń na promieniowanie czyli by osiągnąć ten limit dzienne narażenie nie powinno przekraczać $20 \text{ mSv} / 365 \text{ Dni} = 0,0547 \text{ mSv/dzień}$ (54,7 μ Sv/dzień tj. około 2,3 μ Sv/h).

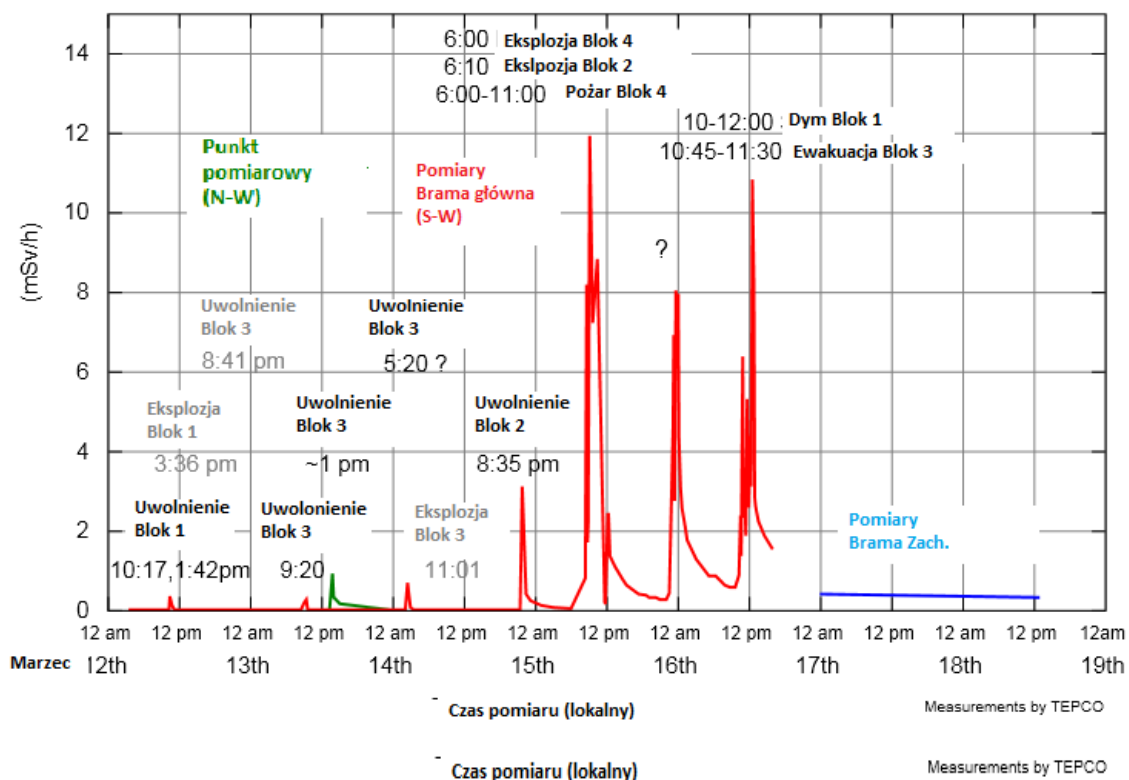
W normalnych warunkach eksploatacji urządzeń jądrowych dopuszczalna dawka dla pracowników narażonych na promieniowanie nie może przekroczyć 100 mSv/5 lat, (czyli 20 mSv /rok), jednakże w ciągu jednego roku nie może przekroczyć 50 mSv. W warunkach zagrożenia, w sytuacjach wykonywania prac awaryjnych (ratowanie życia, ochrony zdrowia, uniknięcia większego narażenia) dopuszcza się dawkę, 500 mSv. Japońskie normy przewidują w takich sytuacjach 100mSv. Wyjątkowo w Fukushima dopuszczono 250 mSv.



Rys. 14 Dawki promieniowania

Opis rozprzestrzeniania się skażeń w wyniku awarii elektrowni w Fukushima jest bardzo trudny ze względu na niezwykle szybkie zmiany sytuacji i rozległość obserwowanego obszaru i niejednorodność obserwacji (podawane są wrywkowe dane utrudniające odtworzenie pełnego obrazu zdarzeń i korelacji czasowych).

Bezpośrednio po trzęsieniu ziemi i przejściu fali tsunami (11 03 2011) nie zanotowano żadnych zmian, ale już na następnego dnia wystąpiły pierwsze zmiany na terenie elektrowni w pobliżu Bloków 1 polegające na wzroście poziomu jodu J^{131} i Cs^{137} . 13 03 2011 po kontrolowanym wypuszczeniu pary w celu obniżenia ciśnienia w reaktorze Bloku 3 pojawiły się pierwsze sygnały o skażeniu radioaktywnym. Ale nie znano jego zasięgu i stopnia zagrożenia. Na terenie elektrowni pomiędzy blokami 2 i 3 poziom promieniowania wynosił 30 mSv/h, a już w chwili potem w pobliżu bloku 3, 400 mSv/h i bloku 4, 100mSv/h. Zalecono by ludność zamieszkała w promieniu pomiędzy 20 i 30 km nie opuszczała domów. Szczególnie trudna sytuacja powstała między 15 i 16 marca 2011 w wyniku eksplozji i pożarów w blokach 2 i 4 oraz gwałtownego wzrostu poziomu promieniowania w bloku 3 z którego ewakuowano pracowników. Według niektórych źródeł w pobliżu reaktora zanotowano poziom promieniowania 1000 mSv/h spadający stopniowo do 600mSv/h. W punkcie pomiarowym przy bramie elektrowni poziom wynosił 10 mSv/h. Zrządzono ewakuację ludności w promieniu 20 km ze szczególnym uwzględnieniem kierunku północno zachodniego gdzie przewidywano największe stężenie skażeń. Na rys.14 przedstawiono pomiary poziomu promieniowania na terenie elektrowni bezpośrednio po 2011 po kontrolowanych wypuszczeniach pary w celu obniżenia ciśnienia i eksplozjach.



Rys. 15 Poziom promieniowania na terenie elektrowni w pierwszych godzinach po awarii.(wg.JAIF)_

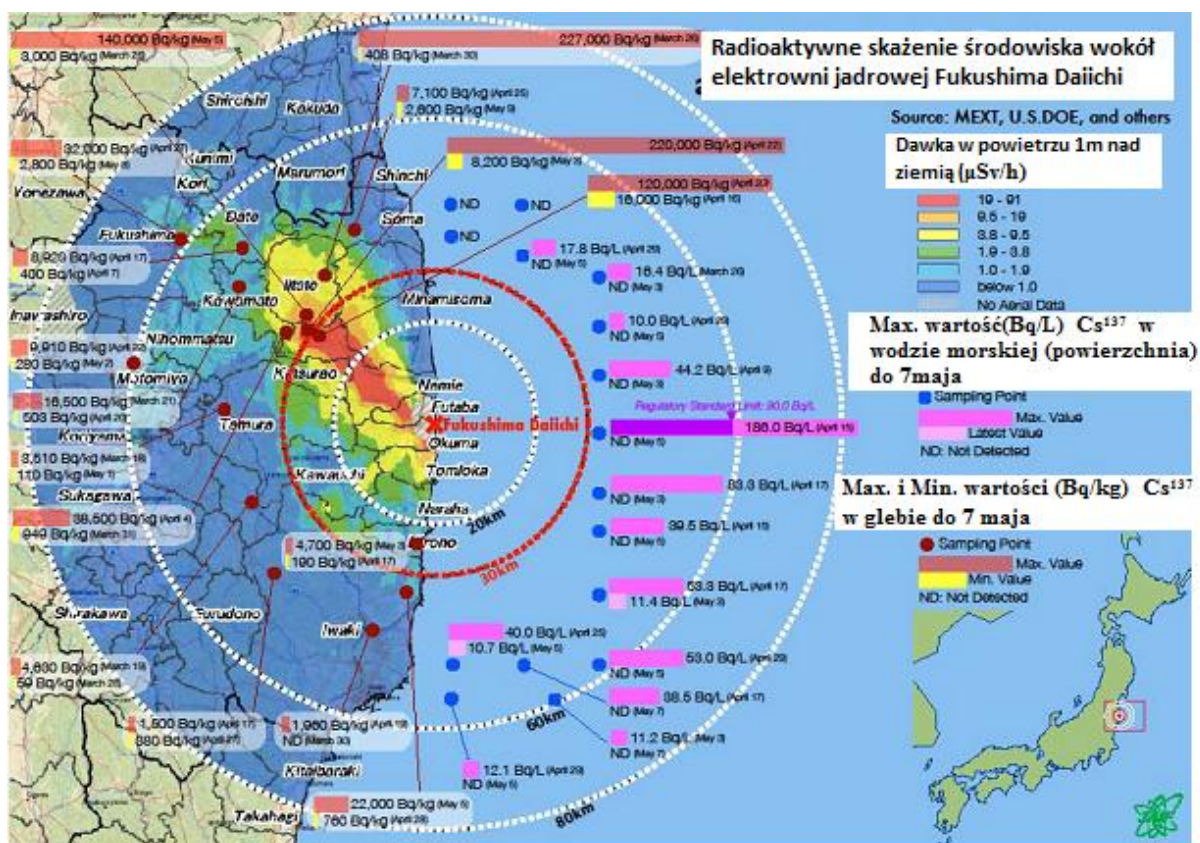
Pomiary wykonane w 47 miastach z udziałem MAEA (*Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej*) nie wykazały znaczącego wzrostu poziomu promieniowania. Jednakże w niektórych obszarach 30 km od elektrowni w przeciągu doby od ostatnich eksplozji zanotowano znaczący wzrost promieniowania osiągający miejscami 80-170 μ Sv/h. W niektórych nawet odległych rejonach zaobserwowano wzrost poziomu jodu J^{131} i cezu Cs^{137} w warzywach, mleku, glebie. 21 marca 2011 (MAEA) podała wyniki pomiarów dokonanych w

promieniu 16–58 km od elektrowni potwierdzające skażenie radioaktywne na poziomie 0,2 – 0,9 MBq/m²

23 03 2011 w oficjalnym komunikacie MEXT (*Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology Ministestwo Edukacji, Kultury, Sportu, Nauki I Technologii*), że w jednym z punktów pomiarowym zlokalizowanym w kierunku północno- zachodnim i oddalonym o 40 km od elektrowni Fukushima aktywność jodu J¹³¹ w glebie wynosiła 300kBq/kg a cezu Cs¹³⁷ 28,1 k Bq/kg. Dzień później w tych samych warunkach J¹³¹ – 1 170 kBq/kg, Cs¹³⁷ 163 kBq/kg.

24 03 2011 Trzech pracowników elektrowni pracujących w Bloku 3 w rejonie zalanym skażoną wodą otrzymało bardzo wysoką dawkę promieniowania w wyniku braku odzieży ochronnej. Dwóch wymagało opieki szpitalnej. W wyniku opadów deszczu w dzielnicy Shinjuku w Tokio zaobserwowano pojawienie się J¹³¹ o aktywności 8,39 kBq/m² i Cs¹³⁴ o aktywności 6,31kBq/m²

26 03 2011 zaobserwowano podniesienie poziomu jodu w wodzie morskiej w pobliżu elektrowni do aktywności 76 kBq/L i cezu 20 kB/L



Rys.16 Wyniki pomiarów po awarii w okolicy elektrowni Fukushima Daiichi (wg JAIF)

29 03 2011 w odległości 330m od wylotu zrzutu wody chłodzącej (patrz rys. 2) aktywność jodu wynosiła 138 kBq/l.

30 03 2011 w odległości 330m od wylotu zrzutu wody chłodzącej (patrz rys. 2) aktywność jodu wynosiła 180 kBq/l. W miejscowości znajdującej się poza strefa o promieniu 30 km zaobserwowano obecność Cs¹³⁷ o aktywności 3,7 MBq/m²,

Wyniki pomiarów w pierwszym miesiącu po awarii w okolicy elektrowni przedstawiono na rys. 15

4.2. Podsumowanie

Pojawienie się skażeń terenu elektrowni i środowiska izotopami jodu, cezu i plutonu zostało zauważone bezpośrednio po kontrolowanym wypuszczeniu pary w celu obniżenia ciśnienia w reaktorze. Izotopy przedostały się do atmosfery gleby i oceanu. Oceny ekspertów międzynarodowych ekspertów stwierdzały, że ilość, aktywność i zasięg skażenia był, co najmniej 10-krotnie mniejszy niż w przypadku podobnej emisji w czasie awarii w Czarnobylu (gdzie nastąpił całkowite stopnienie rdzenia) stanowiąc znacznie mniejsze zagrożenie dla zdrowia ludności szczególnie poza terenem elektrowni. W następnych dniach, po kolejno występujących eksplozjach wodoru i kontrolowanym wypuszczeniu pary radiacja w pobliżu elektrowni oraz emisja radionuklidów wzrastały pulsacyjnie zgodnie z kolejnymi planowanymi i nieplanowanymi uwolnieniami. Wzrosty poziomu radionuklidów trwały krótko, zarówno na terenie elektrowni jak i w dalszej okolicy. W oficjalnym raporcie MAEA podkreślono, że do chwili jego publikacji (czerwiec 2011) nie zanotowano żadnych przypadków niebezpiecznych dla zdrowia objawów działania podwyższonego poziomu promieniowania w zagrożonym awarią rejonie. Należy podkreślić, że pierwsze objawy skutków promieniowania są wykrywane badani morfologiczne zauważalne, gdy jednorazowe, gwałtowne napromieniowanie na całego ciała przekroczy 500 mSv.

W raporcie, TEPCO (czerwiec 2011) stwierdzono, że w pierwszych 4 dob po trzęsieniu ziemi przedostały się do atmosfery (oprócz jodu i cezu) śladowe ilości izotopów strontu S⁹⁰, plutonu (P²³⁸, P²³⁹, P²⁴⁰ i P²⁴¹ – około 50g) neptunu Np²³⁹- 1mg, teluru Te¹²⁹. Z punktu widzenia ochrony radiologicznej ludności najistotniejszym jest jod i cez szybko wchłaniane przez organizm. Zgodnie z początkowymi szacunkami rządu Japonii podczas całej awarii wyostał się cez-137 o aktywności 15 PBq. Wielkość ta jest kwestionowana przez niektóre ośrodki zagraniczne szacujące całkowitą aktywność na 36 PBq. (P skrót przedrostka **pet**a odpowiadającemu współczynnikowi **10¹⁵** jednostki podstawowej).

Najbardziej narażeni na działanie promieniowania byli pracownicy elektrowni, ekipy pomocnicze pomagające przy opanowywaniu awarii oraz ekipy zatrudnione przy pracach porządkowych usuwających skutki trzęsienia ziemi. Jak już wspomniano przed awarią maksymalna dopuszczalna dawka pracowników narażonych na promieniowanie nie może przekroczyć 100 mSv/5 lat. W warunkach zagrożenia, japońskie normy przewidywały w sytuacjach awaryjnych „jednorazowe narażenie” do 100mSv. Wyjątkowo w Fukushima dopuszczono 250 mSv. Jest to poziom dwukrotnie mniejszy od dopuszczanego przez Światowa Organizację Zdrowia. Według informacji MAEA na ciele (głównie twarzach) 17 osób znajdujących się w pobliżu elektrowni osadził się pył radioaktywny i po szybkiej dekontaminacji (woda i mydło) nie było potrzeby hospitalizacji.

W czasie kontrolowanego wypuszczeniu pary (22 03 2011) w Bloku 3 jeden z pracowników otrzymał dawkę 100mSv. Dodatkowo przy wykonywaniu innych prac zostało napromieniowanych jeszcze 7 pracowników a jeden z nich otrzymał dawkę 150 mSv.

24 03 2011 Trzech pracowników elektrowni pracujących w Bloku 3 w rejonie zalanym skażoną wodą otrzymało dawkę 170 mSv i bardzo wysoką dawkę promieniowania od 2 do 6 Sv na nogi, ponieważ nie nosili obuwia ochronnego a firma, która ich zatrudniała nie przewidywała wykonywania prac w skażonej substancjami radioaktywnymi wodzie, której aktywność wynosiła 3,9 TBg/m³ (Tera – 10¹²). Dwóch wymagało opieki szpitalnej. W tym samym czasie 17 pracowników elektrowni otrzymało dawkę 100mSv. 29 03 2011 19 pracowników otrzymało dawkę 100 mSv.

Według oficjalnych danych TEPCO do końca marca dawkę powyżej 100 mSv otrzymało 21 pracowników.

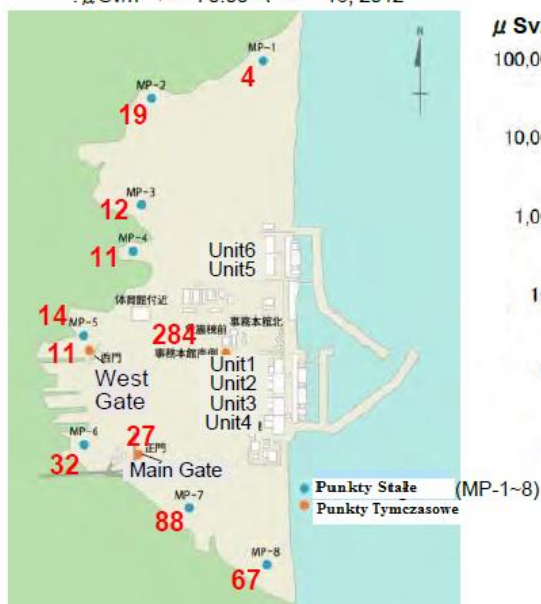
| | | |
|-------------|-----------|----------------|
| 200-250 mSv | otrzymało | 2 pracowników |
| 150-200 mSv | otrzymało | 8 pracowników |
| 100-150 mSv | otrzymało | 11 pracowników |

W lipcu przeprowadzono kontrolę 6700 pracowników zatrudnionych przy usuwaniu skutków awarii.

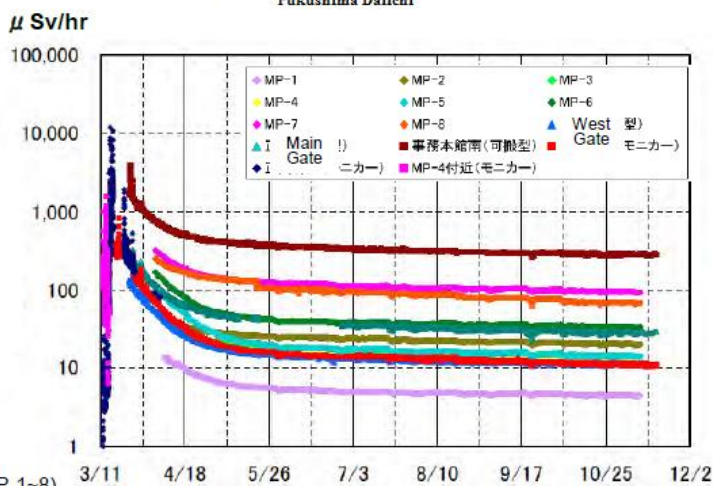
| | | | |
|---------------|---------------|-----------|----------------|
| Dawkę powyżej | 250 mSv | otrzymało | 6 pracowników |
| | 200 – 250 mSv | otrzymało | 3 pracowników |
| | 150 – 200 mSv | otrzymało | 14 pracowników |
| | 100 – 150 mSv | otrzymało | 88 pracowników |

Nieprzerwane monitorowanie od chwili awarii terenu elektrowni wskazuje na systematyczne obniżanie się poziomu promieniowania. Na rys 16 przedstawiono tendencję zmiany poziomu promieniowania na terenie elektrowni Fukushima Daiichi

Rozmieszczenie punktów pomiarowych na terenie elektrowni.
Pomiar dawki w powietrzu
: $\mu\text{Sv/h}$: od f 0:00 Syczeń 16, 2012



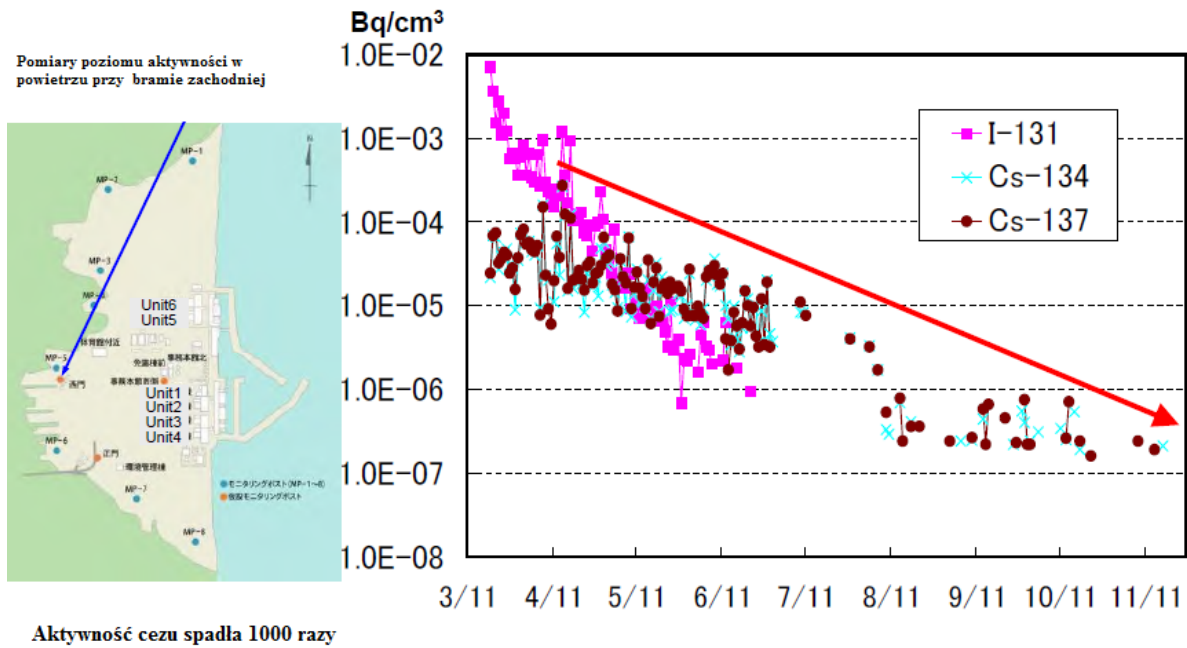
Tendencja spadkowa poziomu promieniowania na terenie elektrowni Fukushima Daiichi



Rys. 17 Tendencję zmiany poziomu promieniowania na terenie elektrowni Fukushima Daiichi (prezentacja Ken Shimizu TEPCO)

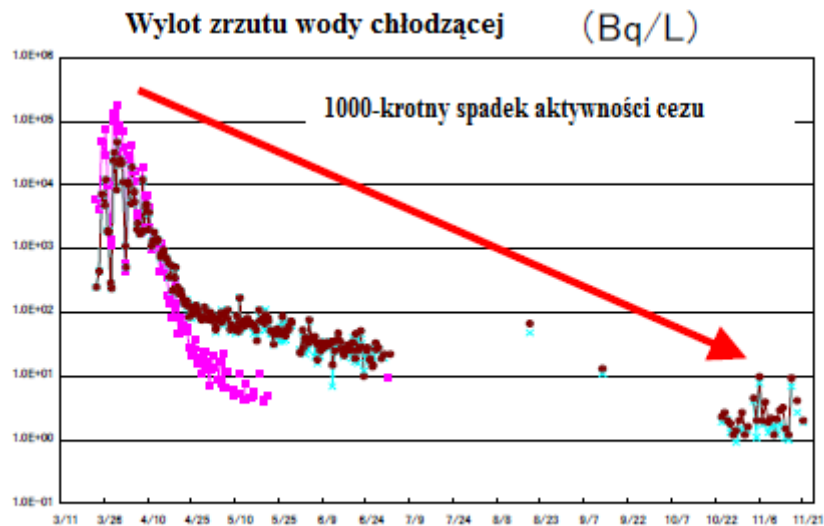
Na rys 18 przedstawiono zmiany aktywności izotopów cezu i jodu na terenie elektrowni na przykładzie pomiarów wykonanych przy bramie zachodniej

Pomiary aktywności izotopów jodu i cezu w powietrzu na terenie elektrowni



Rys. 18 Zmiany aktywności izotopów cezu i jodu na terenie elektrowni na przykładzie pomiarów wykonanych przy bramie zachodniej (prezentacja Ken Shimizu TEPCO)

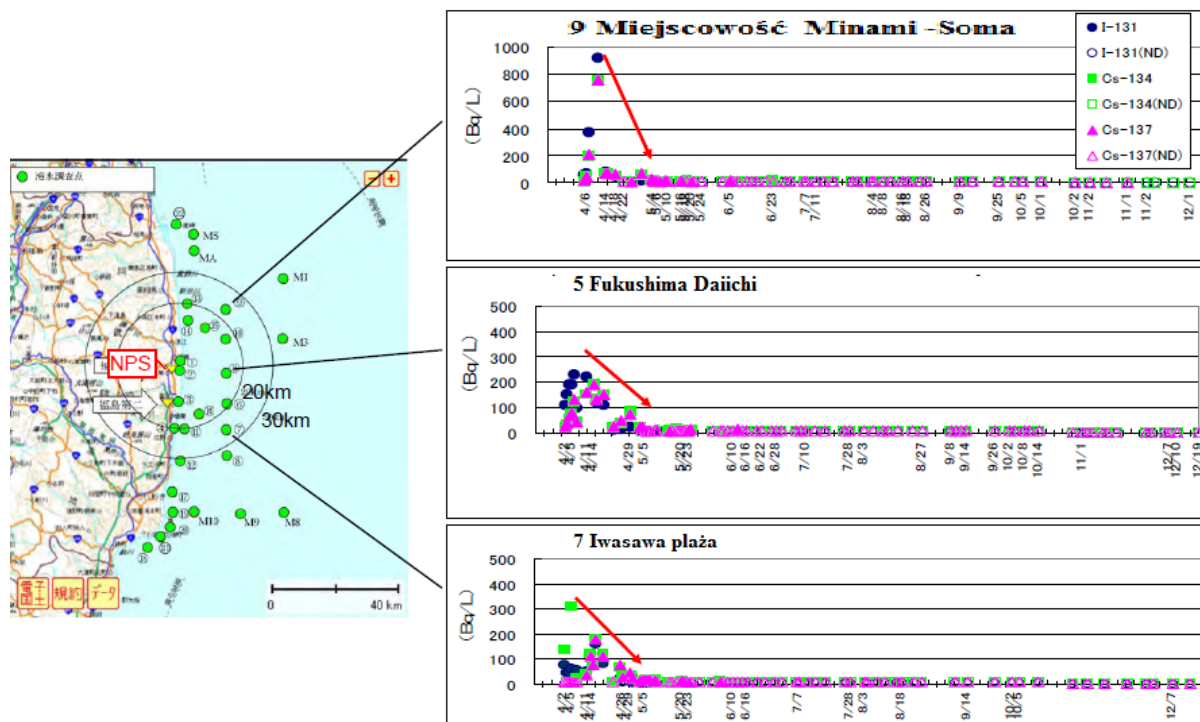
Na rys.19 przedstawiono zmiany aktywności izotopu cezu w pobliżu wylotu wody chłodzącej gdzie 26 03 2011 zarejestrowano znaczny wzrost aktywności jodu i cezu



Rys. 19 Zmiany aktywności izotopu cezu w pobliżu wylotu wody chłodzącej (prezentacja Ken Shimizu TEPCO)

Na rys 20 przedstawiono wyniki zmian poziomu promieniowania w wodzie morskiej;

Wyniki pomiarów poziomu promieniowania w odległości 15 km od brzegu



Rys. 20 Zmiana poziomu promieniowania w wodzie morskiej (prezentacja Ken Shimizu TEPCO)

5. Usuwanie skutków awarii w elektrowni jądrowej Fukushima

Podstawowym problemem po awarii systemów chłodzenia awaryjnego było odtworzenie, nawet prowizoryczne, warunków chłodzenia we wszystkich w zbiornikach, w których zmagazynowane było paliwo jądrowe, a więc przede wszystkim zapewnienie chłodzenia reaktorów i basenów, w których przechowywane było wypalone paliwo. Świeże nieużywane paliwo nie wymaga specjalnego chłodzenia i jest zwykle przechowywane w suchych magazynach.

W elektrowni jądrowej Fukushima stosowany był system chłodzenia w obiegu otwartym. **Chłodzenie w obiegu otwartym** polega na jednokrotnym przepływie wody chłodzącej przez chłodnice (pobieranej z rzeki, jeziora, sztucznego zbiornika wodnego, morza). W celu uzyskania dobrej wydajności chłodzenia w tym systemie konieczne jest przepompowywanie przez układ wymienników ciepła ogromnych ilości wody. Woda ta nie ulega skażeniu w procesie wytwarzania energii elektrycznej, gdyż nie ma kontaktu z elementami radioaktywnymi. Do chłodzenia, w elektrowni Fukushima, w tym systemie w obiegu wtórnym wykorzystywano wodę morską. Analogiczne systemy są stosowane we wszystkich elektrowniach jądrowych w Japonii. Do chłodzenia w tym systemie w obiegu wtórnym wykorzystywano wodę morską. Analogiczne systemy są stosowane we wszystkich elektrowniach jądrowych w Japonii.

Jak już wspomniano, w chwili trzęsienia ziemi uruchomione zostały wszystkie systemy awaryjnego chłodzenia. Fala tsunami spowodowała uszkodzenie systemu awaryjnego zasilania unieruchamiając systemy chłodzenia, co z kolei spowodowało przegrzanie i jak się później okazało nadtopienie rdzeni reaktorów. Dodatkowe zniszczenia powstały w wyniku

eksplozji H₂ wytworzonego w wyniku reakcji w wysokiej temperaturze koszulek cyrkonowych z wodą.

Uszkodzenie systemu awaryjnego chłodzenia oraz możliwość wystąpienia stanu krytycznego wymusiły konieczność użycia do bezpośredniego chłodzenia reaktorów wody morskiej z dodatkiem kwasu borskiego umożliwiającego absorpcję neutronów. Jednocześnie obudowy reaktorów były schładzane przy użyciu sprzętu straży pożarnej. W początkowej fazie usuwania skutków awarii konieczne było również uzupełnienie wody w basenach wypalonego paliwa, której poziom w skutek przecieków i parowania znacznie się obniżył. Ponieważ dostęp do budynków reaktorów 3 i 4 był utrudniony i spodziewano się kolejnych eksplozji i ewentualnych pożarów do transportu wody używano helikopterów i armatek wodnych straży pożarnej.

Użycie do chłodzenia wody morskiej było w początkowej fazie konieczne jednakże spowodowało to np. w reaktorze Nr 1 osadzenie się 26 ton soli. Sól osadzając się na ściankach rur systemu chłodzenia zmniejszyła wydajność przepływu a tym samym chłodzenia jak i powodowała korozję koszulek cyrkonowych prętów paliwowych w reaktorze. Dlatego też konieczne było jak najszybsze wprowadzenie do obiegu wody słodkiej, której zapasy w elektrowni były ograniczone. Po około 12 dniach od początku awarii zaczęto chłodzić reaktory wodą słodką dostarczaną początkowo barkami marynarki wojennej Stanów Zjednoczonych.

Zasadniczym celem i pierwszym celem usuwania skutków awarii jest osiągnięcie tzw. stanu zimnego wyłączenia reaktor tzn. stanu, w którym temperatura rdzenia spadnie poniżej 100 C⁰. Stan taki osiągnięto we wrześniu. Pełną stabilizację temperatury reaktorów i basenów wypalonego paliwa została osiągnięta w styczniu 2012.

Od początku prowadzenia akcji usuwania skutków awarii przewidywano konieczność usunięcia skażonej wysokoaktywnymi zanieczyszczeniami wody (około 110 ton) zalegającej w budynkach reaktorów, turbin, tuneli pochodzącej przecieków systemów chłodzenia i zmagazynowania jej w zbiornikach tak by nie przedostała się ona do środowiska przed oczyszczeniem. Podobnie woda używana na bieżąco do chłodzenia przed jej ponownym wprowadzeniem do obiegu wymaga krótkiego magazynowania. Czas jej magazynowania zależy od wydajności systemu oczyszczania. Powtórne wykorzystanie oczyszczonej wody do chłodzenia ogranicza konieczność jej uzupełniania i uzdatniania trudno dostępnej w tej okolicy wody słodkiej.

5.1. Oczyszczanie wody

Stosowane obecnie nowoczesne metody oczyszczania odpadów ciekłych, są oparte o bardzo finezyjne procesy chemiczne z użyciem wielu związków chemicznych, katalizatorów i bardzo wyrafinowanej aparatury. Zwykle są to złożone, wielostopniowe systemy o wysokiej wydajności stosowanych procesów. Do najczęściej stosowanych metod oczyszczania (separacji i zagęszczania substancji toksycznych i radioaktywnych) odpadów ciekłych w obiektach przemysłu jądrowego należą między innymi:

- **ekstrakcja**, polegająca na wyodrębnieniu poszczególnych pierwiastków składników z ich mieszanin najczęściej drogą dyfuzji
- **strącanie** polegające na wytworzeniu nierozpuszczalnych osadów w reakcjach chemicznych. Proces wytracania jest na ogół wielostopniowy i dopasowywany do

każdego rodzaju zanieczyszczeń (głównie pierwiastków promieniotwórczych Sr, U, Pu itd.) indywidualnie

- **wymiana jonowa** polega na wymianie ruchliwych jonów jednej substancji na inne jony tego samego znaku pochodzące z substancji filtrowanej. Proces zachodzi w wymienniczu jonowym (jonicie) na powierzchni porowatej substancji lub żelu, których cząsteczki chemiczne ulegają dysocjacji elektrolitycznej pod wpływem rozpuszczalnika, którym może być, np. woda. Jonitami mogą być substancje organiczne i nieorganiczne. Wymiana jonowa jest bardzo szeroko ze względu na jej możliwości selektywnej separacji pierwiastków i względnie niskie koszty. Systemy wymiany jonowej są często wspomagane przez systemy filtrów membranowych tworząc bardziej rozbudowane instalacje oczyszczające wykorzystujące zjawisko tzw. odwróconej osmozy. Jest to proces polegający na oddzieleniu, cząsteczek wody od rozpuszczonych w niej substancji. Membrana przepuszczająca cząsteczki wody może być jednocześnie jonitem.. Niezwykle mała porowatość membran pozwala na bardzo skuteczne oczyszczanie.



Zbiorniki pośrednie



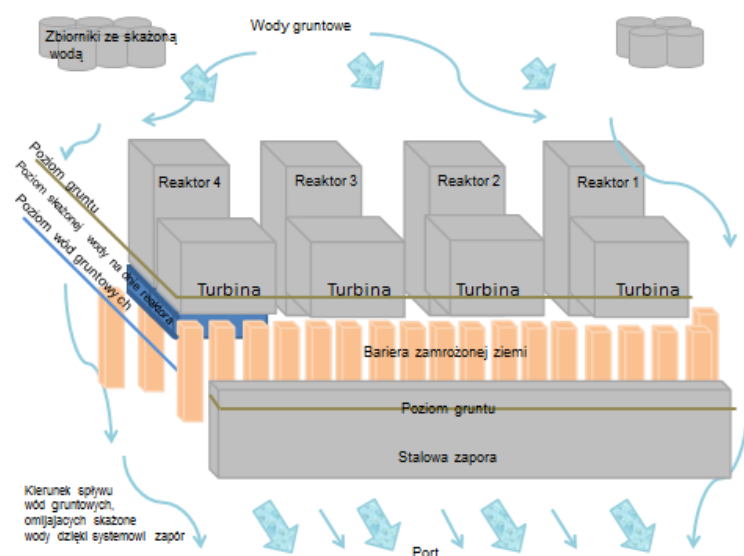
Zbiorniki docelowe

Rys. 21 Zbiorniki ścieków radioaktywnych

(Fot. Ho/Reuters oraz referat A.Toby Seminarium Tepco Warszawa 19 Marzec 2014)

Zbiorniki pośrednie zastępujące tymczasowe. Do końca 2015 zostaną wymienione wszystkie zbiorniki. Prace są prowadzone równolegle przez szereg firm w kilku lokalizacjach na terenie elektrowni.

Przygotowano plan awaryjnego postępowania usuwania zagrożenia spowodowanego przenikaniem skażonej wody do środowiska. Zasadniczym celem opracowanego planu było możliwe szybkie usunięcie źródeł skażeń i odizolowanie ich od kontaktów z wodami gruntowymi oraz zabezpieczenie przechowywanych ciekłych odpadów radioaktywnych przed przeciekami. W pierwszym etapie realizacji planu postanowiono usunąć silnie skażoną wodę z systemu melioracyjnego elektrowni, likwidować powstające przecieki oraz usprawnić metody ich wykrywania oraz zbudować system kanalizacyjny umożliwiający omijanie przez wody gruntowe terenu skażeń. W drugim etapie przewidziano budowę szczelnych barier ochronnych otaczających skażony teren oraz wypompowywanie i uzdatnianie wody w zamkniętym obszarze. Termin realizacji drugiego etapu zaplanowano na dwa lata.



Rys. 22 Wody gruntowe oraz projektowane bariery zaporowe (J. Rzymkowska)

System melioracyjny elektrowni Fukushima został zniszczony czasie trzęsienia ziemi przez falę tsunami. Plany jego odbudowy powstały w październiku 2011 i w kwietniu 2012 po uzyskaniu wszystkich opinii rozpoczęto jego odbudowę zakończoną w 2014 roku. Podstawą nowego systemu jest nowe nadbrzeże o długości około 8km zbudowane ze stalowo - betonowej nieprzepuszczalnej ściany sięgającej 30m poniżej lustra wody. Ma to na celu zatrzymanie wód gruntowych nie przepływających przez wysoko skażone budynki reaktorów i turbin. Ściana może zatrzymywać około 500 – 700 m³ wody o małym stężeniu

zanieczyszczeń radioaktywnych po których usunięciu będzie odprowadzana do morza. Nowy system melioracyjny ma obniżyć poziom wód gruntowych na terenie elektrowni w szczególności w pobliżu reaktorów gdzie dotychczas ten poziom przewyższał poziom wysoko skażonej wody w budynkach reaktorów i turbin o 4m.

Dodatkowo zaprojektowano odseparowanie od wód gruntowych skażonego obszaru przez budowę „ściany lodowej” wokół budynków reaktorów sięgającej od poziomu gruntu do 30 m. Metoda zamrażania gleby w celu odseparowania się od wód gruntowych jest wykorzystywana w górnictwie. Łączna długość ściany miała wynosić 1500 m. W 1550 studniach miały być zamontowane systemy zamrażające do -30C^0 . Ściana miała być wykorzystywana do 2020 roku. Roczne zapotrzebowanie energii konieczne do utrzymania ściany odpowiadałoby zapotrzebowaniu 13 000 gospodarstw. Budowę całej konstrukcji miano ukończyć w kwietniu 2015. W kwietniu 2014 zbudowano 100 m odcinek i przeprowadzono testy odstępując ostatecznie od projektu. Postanowiono zbudować ścianę betonową.

Systemy oczyszczania wymagają odseparowania magazynowania skażonej wody jak również czasowego przechowywania oczyszczonej wody, która powinna powrócić do systemów chłodzenia. Wymaga to ogromnej ilości zbiorników o wysokiej pojemności. Obecnie w elektrowni używane są trzy generacje zbiorników niektóre tworzą połączoną sieć. Często zdarzają przecieki skażonej wody do wód gruntowych.



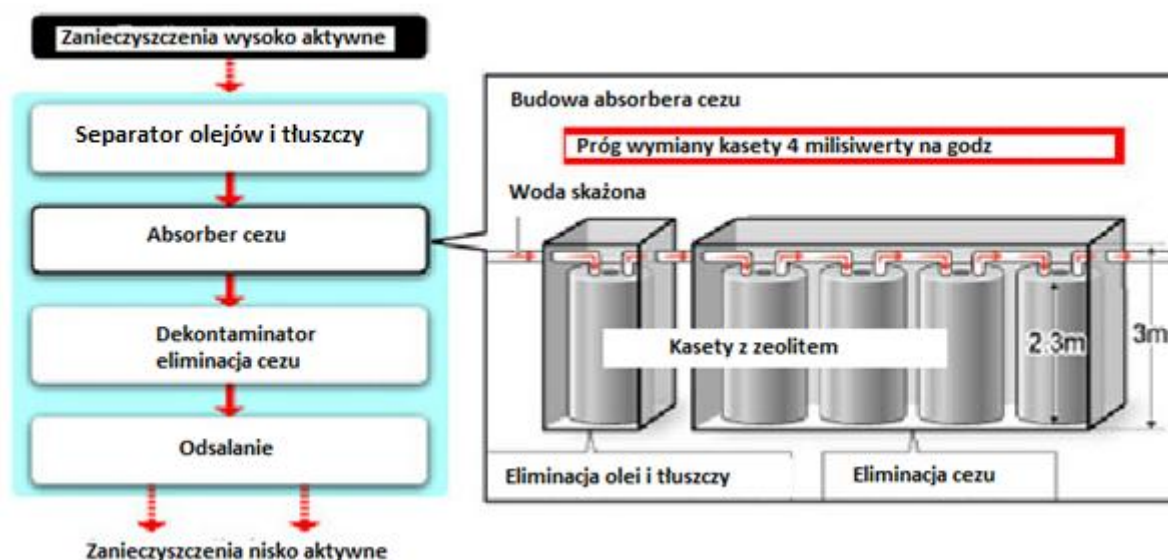
Rys. 23 Rozmieszczenie zbiorników ze skażoną wodą (TEPCO, Reuters)

19 kwietnia 2010 podjęto decyzję budowy systemu oczyszczania i magazynowania skażonej wody. Budowy takiego systemu o wielkiej wydajności, wykorzystującego najczęściej stosowane metody oczyszczania, podjęło się kilka firm:

Toshiba - oferująca filtry do usuwania olejów i tłuszczu

AREVA, której system filtracyjny zawierający związki chemiczne usuwające cez oferowany przez AREVA -Veolia Water posiada wydajność 50 000 litrów/h

KURION firma specjalizująca się od awarii w Three Miles Island w oczyszczaniu ścieków zawierających cez, stront, technet, a nawet pluton i ameryk oferująca aparaturę do filtracji jonowej jonitów nieorganicznych. Jonity organiczne są wrażliwe na sól i nie przewiduje się ich wykorzystania w elektrowni w Fukushima. System filtracyjny (KURION) zastosowany w elektrowni Fukushima składa się z czterech niezależnych linii, z których każda zawiera 6 wymiennych modułów (wymennych kaset) do usuwania zanieczyszczeń olejowych, usuwania technetu i czterech do usuwania cezu i jodu. Zaletą konstrukcji kasetowej jest możliwość wymiany całej kasety w chwili, gdy poziom promieniowania odfiltrowanych odpadów przekroczy określony próg.



Rys. 24 System oczyszczania wody zastosowany w elektrowni jądrowej Fukushima (Toshiba, AREVA, KURION)

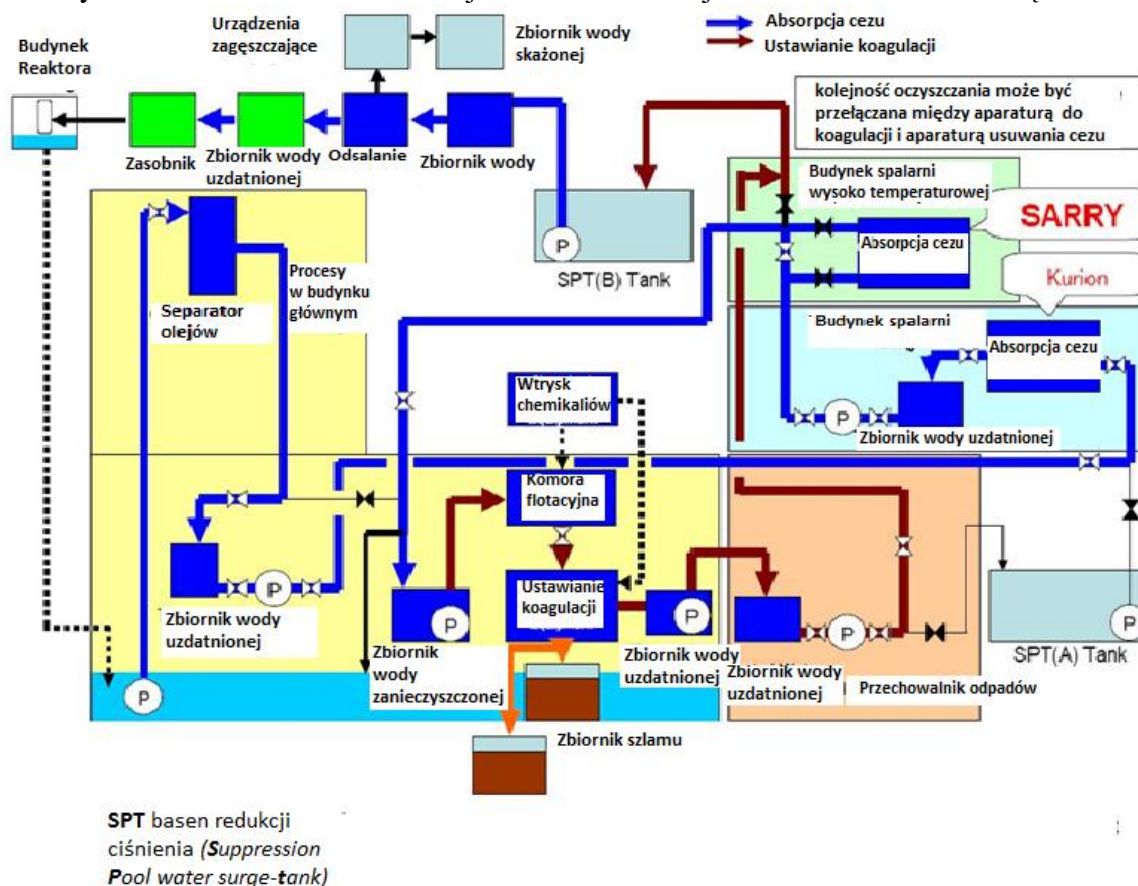


Rys. 25 Zbiornik dekontaminacyjny. Kanał wlotowy

(Nuclear Engineering International www.neimagazine.com)

Uruchomienie całości systemu sterowanego komputerem napotykało na wiele trudności związanych przede wszystkim ze szczelnością połączeń. System pracował nieregularnie z długimi przerwami. Ostatecznie uzyskana wydajność oczyszczania wody wynosiła średnio 800 ton dziennie przy stopniu redukcji zawartości cezu $DF=70\ 000$.

W lipcu firma Toshiba zaoferowała nowy system oczyszczania pod nazwą, SARRY (*Simplified Active Water Retrieve and Recovery System*) proponując jego uruchomienie równoległe do już zainstalowanego systemu. Osiągnięty współczynnik dekontaminacji dla cezu wynosi $DF=50\ 000$. Planowane jest uruchomienie jeszcze dwóch takich urządzeń.



Rys.26 System oczyszczania skażonej radioaktywnie wody opracowany przez Toshiba
(*Ex-skfblogspot.com*)

Ekipy usuwające skutki awarii dążą przede wszystkim do usunięcia źródeł skażenia (materiałów jądrowych), nie dopuszczenia wody do rejonów skażonych i wybudowania zapór uniemożliwiających przedostawanie się wody do środowiska (głównie do oceanu). Obecnie wprowadzane są bardziej wydajne systemy oczyszczania wody separujące więcej różnych substancji promieniotwórczych ALPS (*Advanced Liquid Processing System*). Wszystkie wrażliwe punkty procesu są stale monitorowane i prowadzone są ciągłe pomiary skażeń

szczególnie wody, przybrzeżnej i porcie elektrowni. Duża ilość zbiorników ze skażoną wodą wymaga dodatkowej kontroli i w listopadzie 2013 wprowadzono oprócz codziennych kilku patroli monitoring automatyczny. Prowadzone są prace przygotowawcze do demontażu uszkodzonych reaktorów (głównym problemem jest usunięcie rdzeni) i jest usuwane paliwo z basenów wypalonego paliwa znajdujących się przy każdym reaktorze. Wypalone paliwo z basenu bloku nr 4 zostało usunięte w marcu 20. Całkowita likwidacja reaktorów przewidywana jest za 30 – 40 lat.

Przygotowywany jest również plan przechowywania ścieków radioaktywnych. Najważniejszym problemem jest zmniejszenie ich objętości.

5.2. Usuwanie skutków katastrofy ekologicznej wywołanej falą tsunami

Fala tsunami o wysokości około 14 m (mniej więcej wysokości 5 piętrowej kamienicy) poruszająca się z wielką prędkością spowodowała przede wszystkim zniszczenia w północno-wschodnich prefekturach Japonii, głównie Iwata, Miyagi i Fukushima, jak również w innych położonych bardziej na południe. Zginęło około 15000 ludzi, 4000 uznano za zaginione, tysiące ludzi straciło swój dobytek, miejsca pracy, mieszkania. Trzęsienie ziemi oraz fala tsunami spowodowała ogromne straty w rolnictwie, przemyśle i transporcie. Zniszczeniu uległy drogi, koleje, domy (całe osiedla) linie energetyczne, linie łączności. Powstały zwały gruzu stosy połamanych drzew, złomowiska samochodów, zanieczyszczenia chemiczne, pożary. Dewastacji uległo środowisko naturalne.

Należy przypomnieć, że po głównym trzęsieniu ziemi nastąpiło około 300 trzęsień wtórnych o różnej sile. Fala tsunami oprócz zniszczeń powstałych w czasie napływu, powodowała dalsze szkody w fazie cofania się, zabierając do morza gruz, sprzęt, tym samym zanieczyszczając dodatkowo łowiska.

Zniszczone zostały uprawy ryżu, warzyw, sady, zalane słoną wodą, pokryte szlamem i błotem, chemikaliami wypływającymi ze zniszczonych zbiorników. Niektóre rodziny farmerskie uprawiały ziemię w tej okolicy już od 400 lat a obecnie właściciele zostali pozbawieni możliwości kontynuacji upraw. W rejonach Tohoku, Kanto, 23000 ha zostało zalanych wodą ze szlamem. Największe straty powstały w prefekturze Miyagi, gdzie sytuacja ta dotyczy 15 000 ha, co stanowi 50% całkowitej powierzchni upraw w tym rejonie. Zniszczone zostały też zakłady przetwórcze powiązane z rolnictwem i hodowlą. Jeszcze bardziej dramatyczne straty powstały w rybołówstwie. Zniszczeniu uległy wszystkie porty rybackie, 90 % floty rybackiej (na podstawie danych firm ubezpieczeniowych). Część łodzi została zatopiona część wyniesiona na morze, lub w głąb lądu lub zniszczona w portach. Połowy w tym regionie pokrywały około 10 % zapotrzebowania krajowego. Zniszczeniu uległy hodowle ostryg, krewetek stanowiących 30% krajowej produkcji. Zniszczenia i straty spotęgowane były faktem, że cały przemysł powiązany z rybołówstwem był właśnie przygotowany do rozpoczęcia nowego sezonu. W pobliżu elektrowni wstrzymano uprawy niektórych roślin przede wszystkim ryżu ze względu na wysoki stopień skażenia gleby i pochłanianiu przez te rośliny dużej ilości radioaktywnego ceszu. Produkcja ryżu w prefekturze Fukushima należała do największych (450 000 ton rocznie).

Z powyższych przyczyn Premier Japonii Yoshihiko Noda na konferencji prasowej stwierdził, że „nie będzie odnowienia Japonii bez odbudowy Fukushimy”

Prawie natychmiast po ustąpieniu fali tsunami przystąpiono do usuwania jej skutków rozpoczynając od ratowania i poszukiwania ludzi, organizowania doraźnej pomocy oraz oszacowania ogromu zniszczeń. Należy zwrócić uwagę na całkowitą niemożność komunikacji międzyludzkiej w chwili nawałnicy za wyjątkiem ograniczonych możliwości sieci komórkowych. Oprócz rozległych działań sieci obrony cywilnej np.: monitoringu radiacyjnego (wspomagane później nawet przez organizacje pozarządowe i

międzynarodowe) do akcji włączono wszystkie możliwe służby mające jakikolwiek związek z nie tylko z ochroną radiologiczną, ale i z np.: pomocą medyczną (włączając w to pomoc psychologiczną odgrywającą w skrajnie trudnych warunkach istotną rolę zapobieżeniu panice i depresji).

Starając się koordynować ich działania zgodnie z obowiązującymi procedurami i uzyskać rzeczywisty obraz skażeń zorganizowano sieć monitoringu skażeń.

Jedne z najistotniejszych informacji dotyczyły niepewnej sytuacji w elektrowni jądrowej Fukushima Daiichi, gdzie wybuchy wodoru, wycieki z uszkodzonego basenu wypalonego paliwa, niemożność uruchomienia awaryjnych systemów chłodzenia zniszczonych w czasie przejścia tsunami nie gwarantowały pełnego bezpieczeństwa rejonów w pobliżu elektrowni.

Dlatego w miarę uzyskiwania informacji z obserwacji stanu reaktorów zdecydowano o zmianie kwalifikacji oceny poziomu katastrofy z 4 do najwyższego poziomu 7 w międzynarodowej skali stosowanej przez MAEA – Międzynarodową Agencję Energii Atomowej (*IAEA International Atomic Energy Agency*). (4 stopień - awaria bez znaczącego zagrożenia poza obiektem, **7 stopień - wielka awaria – uwolnienie znacznych ilości substancji promieniotwórczych, długo i krótko życiowych izotopów rozprzestrzeniających się na znacznym obszarze**). Sytuację w elektrowni komplikował fakt braku zasilania, które pozwoliłoby na uruchomienie systemów awaryjnego chłodzenia i neutralizacji gazów, szczególnie wodoru powstającego wewnątrz obudowy reaktora w wyniku reakcji chemicznych zachodzących w podwyższonej temperaturze.

Spodziewano się, że parująca woda odsłoni górne partie rdzenia, powodując jego nadtopienie. Ponadto konieczność zmniejszenia ciśnienia w zbiorniku reaktora spowodowała uwalnianie wodoru, wraz z którym nastąpiła emisja pierwiastków promieniotwórczych - jodu i cezu (J^{131} , Cs^{134} , Cs^{137}), powodując skażenie środowiska.

Dodatkowo w początkowej fazie usuwania skutków awarii konieczne było, ze względu na brak dostatecznej ilości zbiorników, uwolnienie tysięcy litrów skażonej wody do oceanu. Ocenia się, że całkowita emisja tych pierwiastków mogła osiągnąć 10 % podobnej emisji w trakcie awarii w Czarnobylu w 1986 roku. Podwyższone poziomy radioaktywności wykrywano w próbkach mleka, roślin (np. szpinaku) pochodzących z rejonu awarii, przy czym poziomy te nie przekraczały dopuszczalnych norm. Największe skażenia gleby, lasów, rzek zaobserwowano w około 30 kilometrowym paśmie o szerokości kilku kilometrów, rozciągającym się w kierunku północno-zachodnim od elektrowni Fukushima Daiichi.

Niepewność dalszego rozwoju sytuacji (odnosząca się przede wszystkim do skażenia powietrza) spowodowała decyzję o czasowej ewakuacji ludności z zagrożonych terenów. Ustalono rejon tzw. pełnej ewakuacji ludności na obszar o promieniu 20 km od centrum źródła skażeń tzn. od elektrowni Fukushima Daiichi, oraz rejon tzw. ograniczonej ewakuacji w promieniu 30 km. W tym rejonie obowiązywała czasowa ewakuacja, która obowiązuje nadal na obszarach o podwyższonym poziomie promieniowania. Przewidywany jest powrót mieszkańców po przeprowadzeniu dekontaminacji.

W kwietniu 2011 przyjęto wstępny plan usuwania skutków trzęsienia ziemi ze szczególnym uwzględnieniem usuwania skutków awarii elektrowni, tzw. „mapa drogowa odbudowy”.

Usuwanie zniszczeń wywołanych falą tsunami wymagało przede wszystkim odbudowy sieci energetycznych, sieci komunikacyjnych, rozpoczęcie usuwania gruzów, utylizację odpadów zagrażających ludziom i środowisku. W następnej kolejności planowano przystąpienie do odbudowy gospodarki, poprzez pomoc finansową przy zakupie nowego sprzętu, odbudowie portów itp. Szybko powstały spółki odtwarzające przemysł rybołówstwa, wprowadzające jednocześnie jego reorganizację np. ograniczenie liczby portów rybackich, sposoby wykorzystania nowoczesnego drogiego sprzętu. Rozpoczęto przygotowania do

usuwania zasolenia gleby. Metody te były już wcześniej stosowane w Japonii, ponieważ podobne problemy powodowane były przez silne tajfuny często przechodzące nad Japonią.

Powołano specjalne grupy ekspertów, których zadaniem było opracowanie i przedstawienie rządowi analizy przyczyn i skutków awarii. Przeprowadzenia dokładnej analizy skutków awarii będzie możliwe dopiero po ustaleniu pełnego ich zakresu, co będzie procesem długotrwałym, tak, więc końcowa analiza spodziewana jest w połowie 2011 roku.

Japońska Komisja Energii Atomowej (*JAEC - Japan Atomic Energy Commission*) 13 grudnia opublikowała zalecenia dalszego postępowania przy usuwaniu skutków katastrofy, zalecając między innymi, by Rząd:

- przejął pełną odpowiedzialność za usuwanie skutków katastrofy do czasu pełnej dekontaminacji terenu zaczynając od wprowadzenia odpowiedniego systemu i infrastruktury, jak również systemu bezpieczeństwa nadzorowanego przez TEPCO i prowadzenie pełnej, przejrzystej akcji społecznej informacyjnej o podjętych działaniach,

- zobowiązał TEPCO do przygotowania i wprowadzenia planów ochrony radiologicznej i innych pokrewnych działań po pełnej konsultacji i akceptacji organów odpowiedzialnych za bezpieczeństwo,

- przejął pełną koordynację nad zabezpieczeniem działań przed nierozprzestrzenianiem materiałów jądrowych we współpracy z organizacjami międzynarodowymi, głównie MAEA,

- ustanowił niezależną „trzecią” organizację kontrolującą te działania,

- podjął średnio- i długo-terminowe działania, umożliwiające rozwój przemysłowy regionu w przyszłości, jak również wykorzystanie jego zasobów.

Istotne wydaje się zwłaszcza zalecenie powołania niezależnej organizacji kontrolującej i koordynującej wysiłki poprawy bezpieczeństwa jądrowego.

Dotychczas rolę dozoru jądrowego w Japonii pełniła Agencja Bezpieczeństwa Jądrowego i Przemysłowego (*NISA - Nuclear and Industrial Safety Agency*) nadzorowana przez Komisję Bezpieczeństwa jądrowego (*NSC - Nuclear Safety Commission*) i Japońską Komisję Energii Atomowej (*JAEC - Japan Atomic Energy Commission*), które z kolei podlegają prezydium Rządu (*Cabinet Office*). Ponadto Agencja Bezpieczeństwa Jądrowego i Przemysłowego *NISA* jest administracyjnie podległa Ministerstwu Gospodarki, Handlu i Przemysłu (*METI – Ministry of Economy, Trade and Industry*), co budzi liczne zastrzeżenia. Oprócz tego istnieje Japońska Organizacja Bezpieczeństwa Energii Jądrowej (*JNESO – Japan Nuclear Energy Safety Organization*), zrzeszająca specjalistów z różnych dziedzin, niebędąca agendą rządową. We wrześniu 2012 powołano nową organizację przejmującą całkowicie rolę dozoru jądrowego jednocześnie likwidując *NISA*. Nową organizację Urząd Dozoru Jądrowego (*Nuclear Regulation Authority*) podporządkowano Ministerstwu Środowiska.

Osobnym problemem było przygotowanie „mapy drogowej” dla usuwania skutków awarii w elektrowni Fukushima Daiichi. Pierwszym i podstawowym celem usuwania skutków było osiągnięcie stabilnych warunków chłodzenia reaktorów i paliwa zmagazynowanego w basenach, oraz ograniczenie emisji pierwiastków promieniotwórczych tak, by ewakuowana bezpośrednio po awarii ludność mogła powrócić do miejsc zamieszkania.

W czasie posiedzenia Komitetu Szybkiego Reagowania w wypadku Awarii Jądrowych, które miało miejsce 16 grudnia 2011 pod przewodnictwem Premiera Yohihiko Nody oświadczone, że sytuacja w elektrowni jądrowej Fukushima Daiichi została opanowana, ponieważ osiągnięto stan zimnego wyłączenia. Określenie zimne wyłączenie w czasie normalnej pracy reaktora odpowiada stanowi, w którym temperatura wody chłodzącej w reaktorze jest poniżej 100 °C i chłodzenie może być kontynuowane. Stan taki pozwala

zdejść pokrywę reaktora tzn. otworzyć reaktor w warunkach normalnego ciśnienia atmosferycznego.

Zakładając, że rdzenie w niektórych reaktorach uległy stopieniu, warunkiem uznawania, że osiągnięto stan zimnego wyłączenia, jest by temperatura w dolnej części obudowy ciśnieniowej i wewnątrz zbiornika ciśnieniowego była poniżej 100 °C. Wytwarzanie pary w zbiorniku może być wówczas kontrolowane przez wtryskiwanie wody, uwalnianie materiałów radioaktywnych jest małe (obecnie w granicach elektrowni dawka roczna nie przekracza 0,1 µSv/h), co sprawia, że zapewnione są podstawowe warunki bezpieczeństwa.

Pierwszy i bardzo trudny **etap** przedstawionej przez TEPCO (*Tokyo Electric Power Company*) w kwietniu „**mapy drogowej**” usuwania skutków awarii w elektrowni już osiągnięto. Należy podkreślić, że przewidywano zakończenie tego etapu dopiero na początku 2012, a jego celem było osiągnięcie stanu zimnego wyłączenia i likwidacja emisji substancji promieniotwórczych do środowiska. W tym celu rozpoczęto (10 sierpnia 2011) prace nad zabezpieczeniem zniszczonych budynków reaktorów. TEPCO postanowiło przykryć, a właściwie obudować budynki reaktorów szczelnym, ogniotrwałym, plastikowym „namiotem” rozpiętym na stalowej konstrukcji wyposażonym w systemy wentylacyjne. Celem ustawienia tych konstrukcji (odpornych na warunki atmosferyczne, w tym na opady śniegu i silne wiatry) jest kontrola i zatrzymywanie uwalnianych substancji promieniotwórczych. Konstrukcja namiotów jest monitorowana przez systemy czujników ciśnienia, wilgotności, temperatury pozwalających sprawdzać szczelność, kamery, detektory promieniowania itd.

Rozpoczęto prace przygotowawcze do usunięcia wypalonego paliwa z basenów.

Nowatorskim przedsięwzięciem jest sprawdzenie przed otwarciem pokrywy reaktora jego stanu przy pomocy metody endoskopowej. Spodziewając się nadtopienia rdzenia, co mogło uszkodzić różne elementy wewnątrz obudowy ciśnieniowej, postanowiono wprowadzić kamerę do wnętrza reaktora Nr 2. Średnica kamery odpornej na promieniowanie i temperaturę (wraz oświetleniem) i 10 metrowego kabla wynosi 8 mm. Prace mają się rozpocząć w styczniu 2012. Są to przygotowania do usunięcia stopionego rdzenia i demontażu reaktorów. Przewiduje się, że do pełnego demontażu najbardziej niebezpiecznych elementów będą używane specjalnie do tego celu zaprojektowane roboty.

W **drugim etapie** proponowanej „**mapy drogowej**”, przewidzianym do realizacji w ciągu dwóch lat planuje się:

- stopniowe usuwanie paliwa z basenów wypalonego paliwa (w Bloku 4 w okresie 2 lat)
- obniżenie poziomu promieniowania, na terenie elektrowni, pochodzącego z wtórnych źródeł (odpadów powstałych w czasie dekontaminacji, oczyszczania ścieków itp.) do poziomu 1mSv/rok
- utrzymywanie i ulepszanie systemów chłodzenia reaktorów i basenów wypalonego paliwa
- prowadzenie prac badawczo-rozwojowych nad opracowaniem metod dekontaminacji i sposobu usuwania nadtopionego paliwa w rdzeniach
- prowadzenie prac badawczo-rozwojowych nad opracowaniem metod utylizacji odpadów radioaktywnych i ich składowaniem

W **trzecim etapie** proponowanej „**mapy drogowej**”, przewidzianym do realizacji w ciągu dziesięciu lat planuje się:

- całkowite usunięcie paliwa z rdzeni reaktorów i basenów we wszystkich Blokach

- zakończenie przygotowań do usunięcia szczątków paliwa, zakończenie dekontaminacji wnętrz budynków, dekontaminacja i zalanie wodą obudów bezpieczeństwa reaktorów i ostateczne usunięcie paliwa (ostateczny termin 10 lat)
- kontynuacja ulepszanie systemów chłodzenia reaktorów i basenów wypalonego paliwa i podtrzymywanie chłodzenia
- zakończenie utylizacji odpadów ciekłych
- kontynuacja prac badawczo -rozwojowych nad opracowaniem metod utylizacji odpadów radioaktywnych i ich składowaniem oraz rozpoczęcie prac badawczo -rozwojowych nad opracowaniem metod likwidacji reaktorów

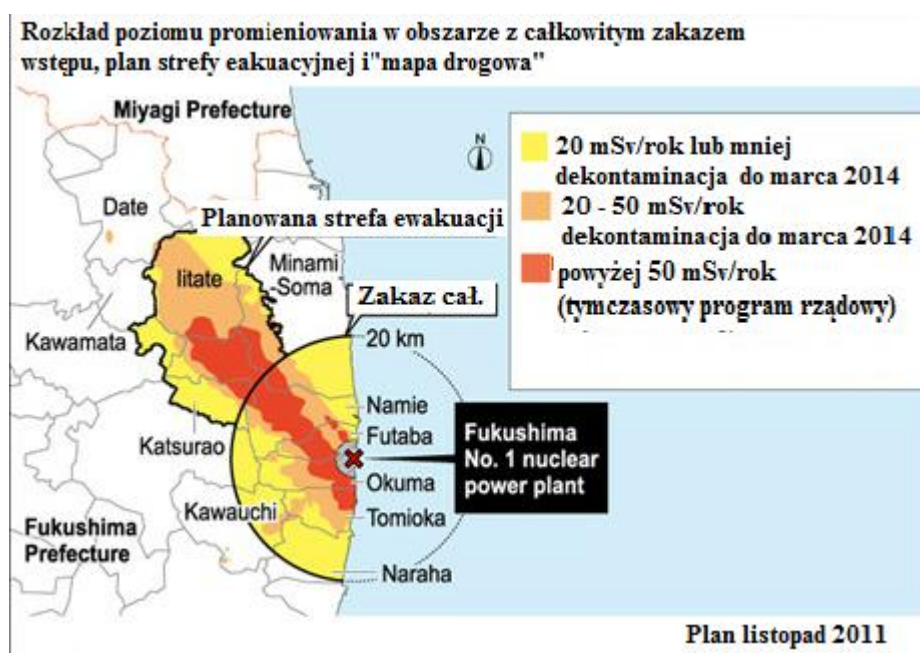
W **czwartym etapie** proponowanej **"mapy drogowej"**, przewidzianym do realizacji w przeciągu ciągu 30 40lat planuje się:

- ostateczne zakończenie procesu usuwania paliwa (20 – 25lat)
- ostateczna likwidacja reaktorów
- utylizacja odpadów

Oczywiście wszystkim tym działaniom towarzyszyć będą szkolenia pracowników i stałe poprawianie bezpieczeństwa ich pracy.

W związku z postępującą normalizacją na terenie elektrowni Fukushima Daiichi Rząd Japonii postanowił zmienić zasady dotyczące stref ewakuacji, a ściślej możliwości powrotu ludności na wybrane obszary. Ostateczne decyzje zostaną podjęte na początku 2012 roku.

Przewiduje się wprowadzenie trzech stref w zależności od poziomu promieniowania. W obszarach, w których moc dawki promieniowania jest mniejsza niż 20 mSv/rok rząd podejmie starania o jak najszybszy powrót mieszkańców do swoich domów. W obszarach, gdzie moc dawki może przekroczyć 20 mSv/rok, zalecane jest powstrzymanie się od powrotu. W obszarach, gdzie moc dawki przekracza 50 mSv/rok, powrót jest zabroniony. Określenie stref powinno nastąpiło do końca marca 2012 i było prowadzone w porozumieniu z władzami lokalnymi. Całkowitym zakazem powrotu objęty jest obszar w odległości 3 km od elektrowni. Oczywiście decyzje te nie spotykają się z pełną aprobatą mieszkańców ewakuowanych terenów, żądających jak najszybszego umożliwienia im powrotu do normalnego życia, a w przypadku zakazu powrotu umożliwienie nowego startu w innej lokalizacji.



Rys. 27 Rozkład poziomu promieniowania

Chcąc pospieszyć proces rekultywacji zniszczonych terenów przygotowano rozległy program usuwania skutków trzęsienia ziemi w dużej mierze oparty na bogatych wcześniejszych doświadczeniach, ale uzupełniony o konieczność dekontaminacji terenu, zabudowań i lasów. Zakończeniem tego procesu będzie, wg założeń programu rządowego jest, powrót mieszkańców do swoich domów. Rząd jest zobowiązany do przygotowania kolejnej „**mapy drogowej**” **przeprowadzenia dekontaminacji** skażonych obszarów

Przewiduje się wprowadzenie trzech stref w zależności od poziomu promieniowania. W obszarach, w których moc dawki promieniowania jest mniejsza niż 20 mSv/rok rząd podejmie starania o jak najszybszy powrót mieszkańców do swoich domów. W obszarach, gdzie moc dawki może przekroczyć 20 mSv/rok, zalecane jest powstrzymanie się od powrotu. W obszarach, gdzie moc dawki przekracza 50 mSv/rok, powrót jest zabroniony. Określenie stref powinno nastąpiło w marcu 2012 i jest prowadzone w porozumieniu z władzami lokalnymi. Całkowitym zakazem powrotu objęty jest obszar w odległości 3 km od elektrowni. Oczywiście decyzje te nie spotykają się z pełną aprobatą mieszkańców ewakuowanych terenów, żądających jak najszybszego umożliwienia im powrotu do normalnego życia, a w przypadku zakazu powrotu umożliwienie nowego startu w innej lokalizacji. Na rys 5 przedstawiono projekt dekontaminacji obszarów objętych ewakuacją. Do określenia poziomu promieniowania pomiary wykonywane są w powietrzu na wysokości 1m.

Ponieważ powrót do domów ewakuowanych ludzi zależy od wielu czynników. Rząd prowadzi spotkania wyjaśniające przedstawiając terminarz prac mających się rozpocząć na początku czerwca uwzględniający ich kolejność dekontaminacji (priorytety mają szlaki komunikacyjne) napotykanymi trudnościami (niektóre obszary nawet w najmniej skażonej strefie wymagają specjalnych czynności (np. porowate powierzchnie asfalt, beton). Właściciele gruntów domów są proszeni o wyrażenie zgody na penetrację ich obejść przez ekipy dekontaminujące. Innym problemem szczególnie w rejonach o większym skażeniu jest zapewnienie bezpieczeństwa pracy ludzi zatrudnionych bezpośrednio przy usuwaniu zanieczyszczeń (odpowiedniej odzieży ochronnej, skróceniu czasu pracy itp.) Dekontaminacja najmniej skażonych (poniżej 10 mSv/rok) terenów włącznie z dekontaminacją gleby powinna zakończyć się grudniu 2012 a terenów o skażeniu 20mSv/rok do marca 2014

Do marca 2014 powinna również zakończyć się dekontaminacja niezamieszkałych terenów o skażeniu pomiędzy 20 a 50 mSv/rok. Powyżej skażenia 50 mSv/rok na razie będą prowadzone prace badawcze i trudno jest zaprojektować szczegółowy plan prac.

Przewiduje się, że proces usuwania zniszczeń w elektrowni może potrwać od 30 do 40 lat. Proces odnowy środowiska może być krótszy, ponieważ jest wspomagany przez zjawiska naturalne, np. opady powodujące wymywanie skażonej gleby do rzek, krótki czas połowicznego rozpadu niektórych pierwiastków, zmniejszenie ich koncentracji na skutek różnych działań, jak np. odbudowa dróg wymagająca wielu prac ziemnych.

Od 1 stycznia 2012 weszła w Japonii w życie regulacja dotycząca dekontaminacji obszarów skażonych w wyniku awarii elektrowni Fukushima Daiichi. Niektóre koncerny oferują opracowanie specjalnych przeznaczonych do tego celu urządzeń, których konstrukcja została wstępnie przetestowana na terenie elektrowni. Urządzenie do dekontaminacji i oczyszczania może dziennie usuwać 97% substancji radioaktywnych z 1, 7 ton skażonej gleby i mułu. Inne oferowane i sprawdzone urządzenie może usuwać nisko aktywne substancje z wody w zbiornikach i kanalizacji. Zainteresowanie tymi urządzeniami wykazały przede wszystkim ośrodki przemysłowe i niektóre władze regionalne. Toshiba opracowuje bardziej ekonomiczne i nowsze rozwiązanie o zwiększonej wydajności.

Rząd Japonii proponuje utworzyć w pobliżu miejscowości Futaba na północny zachód od elektrowni Fukushima, (jednym z najbardziej skażonych terenów) czasowe składowisko odpadów dekontaminacji z innych terenów. Rozpoczęto negocjacje z władzami lokalnymi i dyskusję społeczną. Proponowany jest państwowy wykup terenu. W Prefekturze Fukushima 80 % powierzchni wymaga dekontaminacji. Rząd będzie pokrywał część kosztów dekontaminacji w obszarach, w których moc dawki przewyższa $0,23 \mu\text{Sv/h}$, oraz poniesie koszty oczyszczania z mułu, którego aktywność osiąga 8000Bq/kg . Postanowiono również wytypować priorytetowe miejsca dekontaminacji.

Dekontaminację (eksperymentalną) wybranych obiektów rozpoczęto 18 listopada 2011. Wstępnie oczyszczono 4 budynki władz regionalnych. Do dekontaminacji powołano 900 wyspecjalizowanych zespołów. Do oczyszczenia przewidziano 110 000 budynków i oczekuje się na zgodę właścicieli na jej przeprowadzenie. Mobilne zespoły dekontaminacyjne są wyposażone w przewożne urządzenia dozymetryczne pozwalające sprawdzać, czy pracownicy zespołów nie zostali skażeni (tzw. liczniki skażeń całego ciała), oraz urządzenia do dekontaminacji odzieży ochronnej.

W całej skażonej okolicy, od chwili awarii, (w promieniu 30 km od centrum źródła skażeń tzn. od elektrowni Fukushima Daiichi), prowadzone są systematyczne pomiary poziomu promieniowania powietrza, gleby, oraz wód. Obserwowana jest wyraźna tendencja spadkowa. Tym niemniej w wątpliwych rejonach szkoły pozostają zamknięte i wszędzie zostały dostarczone dozymetry.

Władze lokalne rozpoczęły i prowadzą badania tarczycy 360 000 młodzieży do lat 18 zamieszkałej w prefekturze Fukushima. Przebadane osoby pozostaną pod obserwacją do końca życia. Od chwili awarii przebadano około 2 000 000 ludzi w miastach i wioskach nawet w promieniu do 50 km od elektrowni Fukushima Daiichi. Nie stwierdzono poważniejszych przypadków napromieniowania (97 % badanej populacji była narażona na dawkę poniżej 5 mSv). Podjęto obserwację i badania 25 000 dzieci urodzonych w tym rejonie w tym czasie, które pozostaną pod obserwacją do osiągnięcia dojrzałości. Publikowane są regularnie mapy pokazujące rozprzestrzenienie się różnych izotopów pierwiastków Cs, J, Pu, Sr, Cu, Te, które były wykryte w glebie wokół Fukushimy. Obecnie zabrania się upraw ryżu w tych rejonach. Prowadzone są stałe badania żywności, monitorowane są hodowle bydła, zbiorniki wody pitnej, lasy oraz wody przybrzeżne.

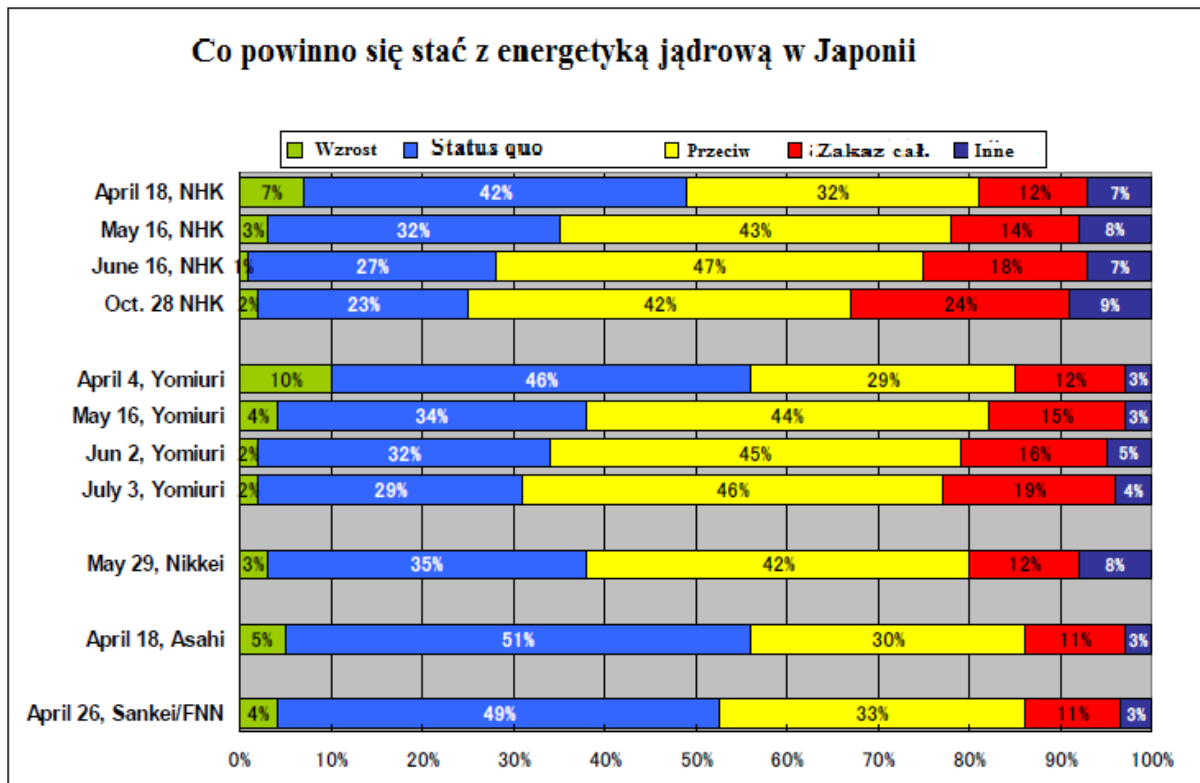
Rząd Japonii postanowił w ciągu kilku lat (do 2015) rozmieścić na dnie oceanu w najbardziej prawdopodobnych miejscach występowania trzęsień ziemi, podwodne czujniki sejsmiczne, oparte o hydrociśnieniowe detektory, tzw. czujniki tsunami. Docelowo planowane jest okrążenie całej Japonii podobnymi czujnikami umieszczanymi nawet 400 km od jej brzegu. Najwięcej tych czujników znajdzie się w okolicy prefektur Miyagi i Fukushima.

6. Perspektywy energetyki jądrowej

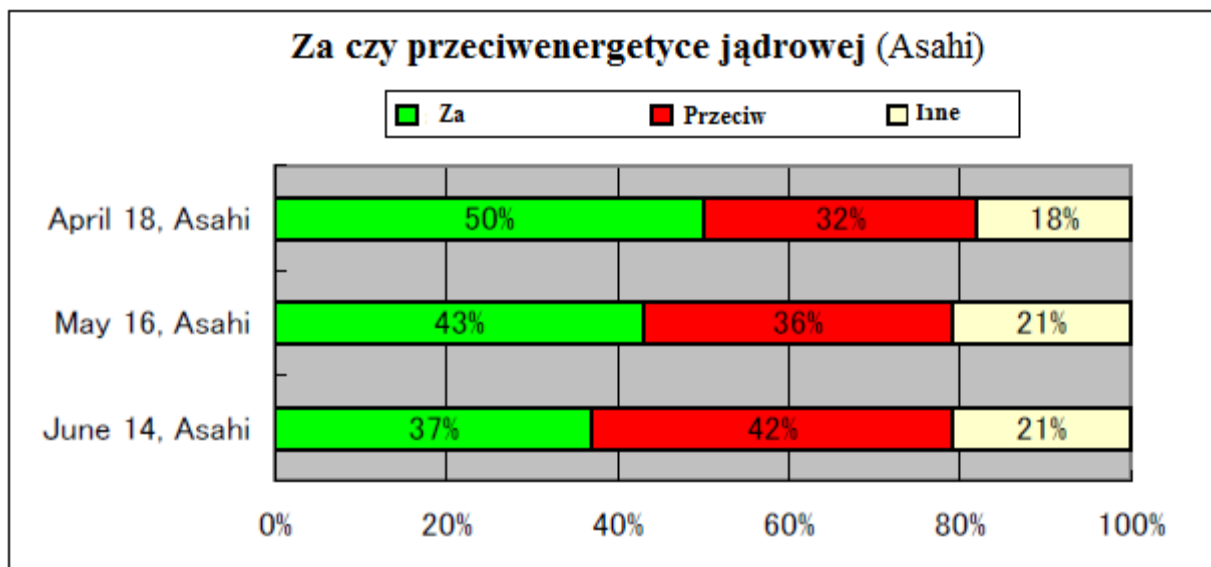
Z przedstawionego raportu ekspertów można przypuszczać, że Japonia będzie kontynuować rozbudowę energetyki jądrowej wprowadzając nowocześniejsze rozwiązania i zdecydowanie poprawiając systemy bezpieczeństwa. Wynika to przede wszystkim z faktu, że rozwijająca się dynamicznie gospodarka Japonii wymaga stałych i stabilnych dostaw energii. Mimo wprowadzenia coraz bardziej energooszczędnych technologii, zapotrzebowanie na energię nieustannie rośnie. Ponieważ naturalne zasoby pierwotnych źródeł energii (węgla, gazu, ropy, uranu) są bardzo ograniczone, to dla zaspokojenia niezbędnych potrzeb Japonia jest zmuszona

do importu około 80% potrzebnych surowców energetycznych. Dodatkowo, położenie na wyspach uniemożliwia sprowadzanie energii z państw sąsiednich. Dlatego też, dążąc do zapewnienia stabilności energetycznej zdecydowano się na intensywny rozwój energetyki jądrowej. Japonia posiada ograniczone zasoby pierwotnych źródeł energii, położenie na wyspach uniemożliwia bezpośredni import energii i będąc krajem wysoko uprzemysłowionym o gęstym zaludnieniu inwestowała w energetykę jądrową. Zużycie energii na osobę w roku 1965 wynosiło 1776 kWh a w roku 2010 8378 kWh. Przed awarią w Fukushima zwracano przede wszystkim uwagę na bezpieczeństwo energetyczne, ochronę środowiska i ekonomiczność pozyskiwania energii. Obecnie dominującym elementem jest bezpieczeństwo ludności. Bezpośrednim skutkiem awarii jest utrata zaufania społecznego do energetyki jądrowej, strach przed napromieniowaniem. Powoduje to konieczność ponownej oceny bezpieczeństwa jądrowego i jądrowej polityki energetycznej. Obecnie 48 reaktorów energetycznych może być ponownie uruchomionych. Od września 2013 wszystkie reaktory są wyłączone. Dziewięć reaktorów jest w stanie likwidacji. Przed awarią projektowano wybudować i uruchomić do roku 2013 nowych 14 reaktorów. Kontynuowana jest budowa czterech najbardziej zaawansowanych. 8 lipca 2013 przyjęto nowe zalecenia dotyczące bezpieczeństwa i obecnie po wprowadzeniu niezbędnych zmian zgłoszono 17 reaktorów do ponownego uruchomienia. Zezwolenie wydawać będzie nowo utworzony po awarii (19 września 2012) Urząd Dozoru Jądrowego (*Nuclear Regulation Authority – NRA*) działający w ramach Ministerstwa Środowiska. Spodziewane jest wydanie zezwoleń jeszcze w tym roku. Po wyłączeniu energetyki jądrowej uruchomiono elektrownie wykorzystujące paliwa kopalne, wprowadzono ograniczenia zużycia energii. Spowodowało to znaczny wzrost kosztów produkcji energii, zwiększenie emisji dwutlenku węgla, wzrost ceny energii dla użytkowników przemysłowych (15%) i indywidualnych (10%). Japonia będzie rozwijać różne metody produkcji energii elektrycznej włączając w to źródła odnawialne jednocześnie starając się powrócić do energetyki jądrowej wprowadzając ostrzejsze wymagania dotyczące bezpieczeństwa, metody przewidywania kataklizmów żywiołowych powiązane z systemami ostrzegania. Nie zauważono istotnego wpływu awarii w Fukushima na rozwój energetyki jądrowej w świecie. Obecnie przodującym krajem budującym najwięcej reaktorów energetycznych są Chiny. Aktualnie na świecie pracuje 430 reaktorów energetycznych a nowo budowanych jest 70. W kilku krajach np. Wietnamie, Arabii Saudyjskiej rozpoczęto budowę energetyki jądrowej od podstaw.

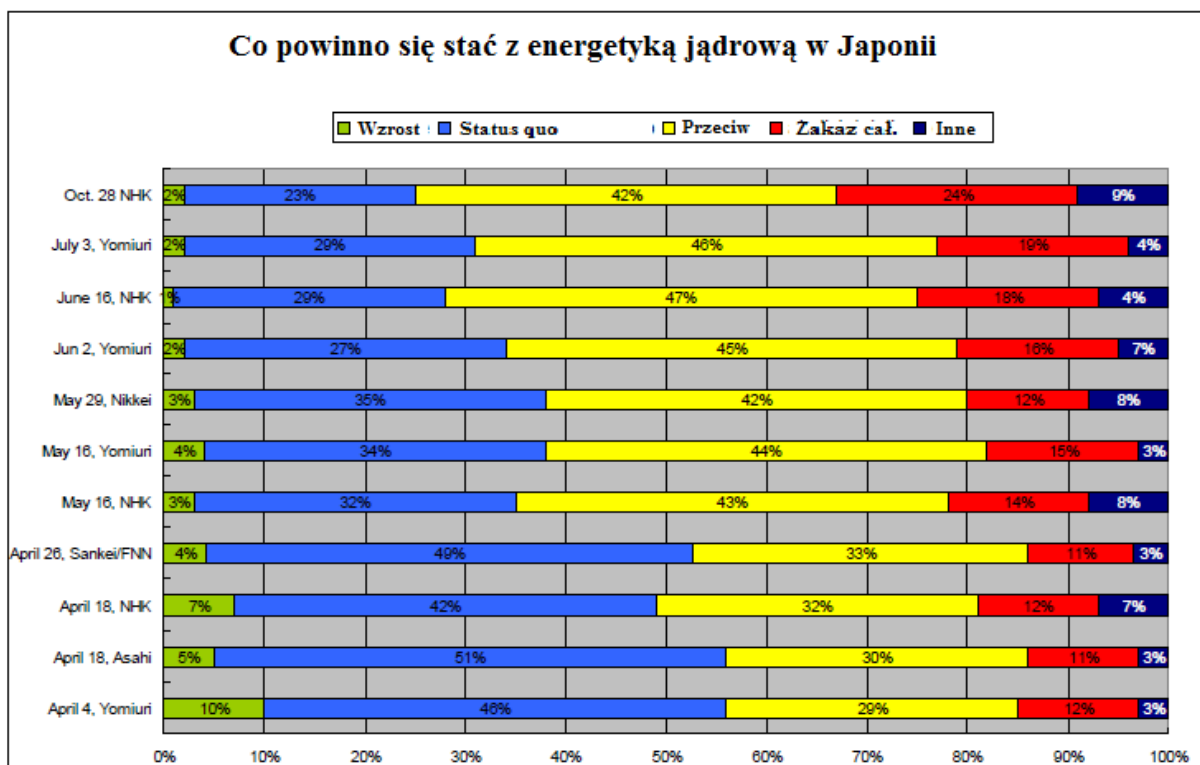
Jednakże po ostatniej awarii w Fukushima stopień akceptacji społecznej mimo zrozumienia konieczności kontynuowania dotychczasowej polityki energetycznej wyraźnie zmalał, co przedstawiono na rys.25. Początkowo to jest od momentu katastrofy energetyki do czerwca za wzrostem energetyki jądrowej opowiadała się większość społeczeństwa, ale w miarę upływu czasu pod koniec roku zanotowano bardzo poważny spadek poparcia.



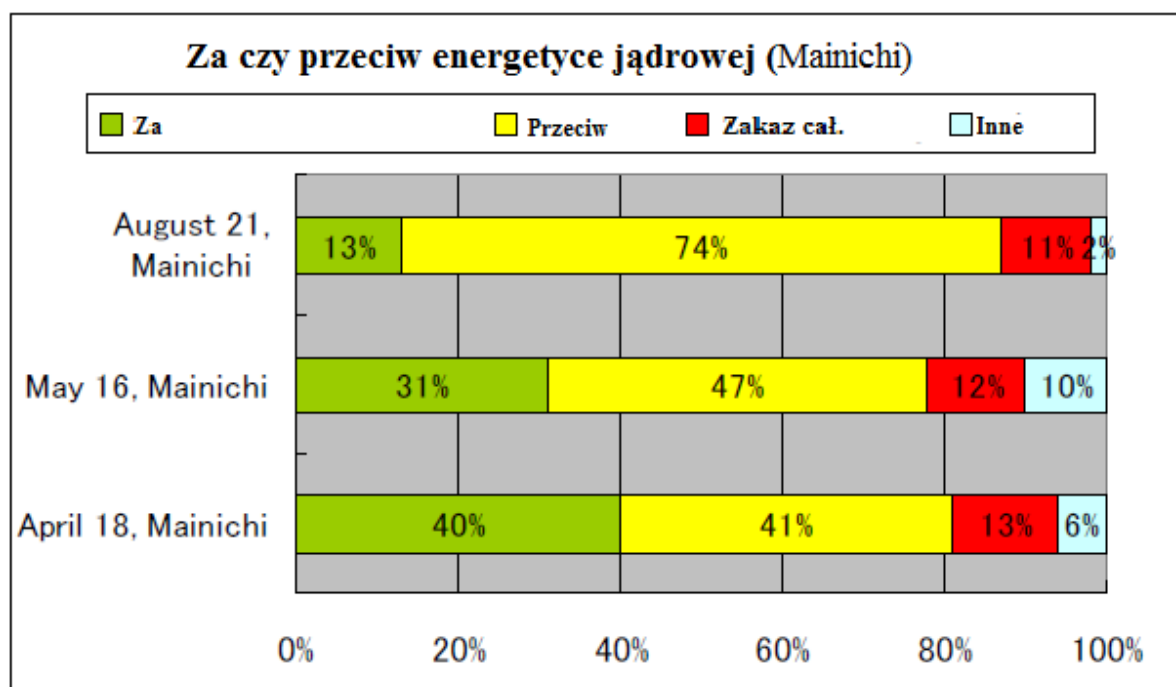
Źródło JAIF (DailyYomiuri, Asahi Shinbun)



Źródło JAIF (DailyYomiuri, Asahi Shinbun)



Źródło JAIF (DailyYomiuri, Asahi Shinbun)



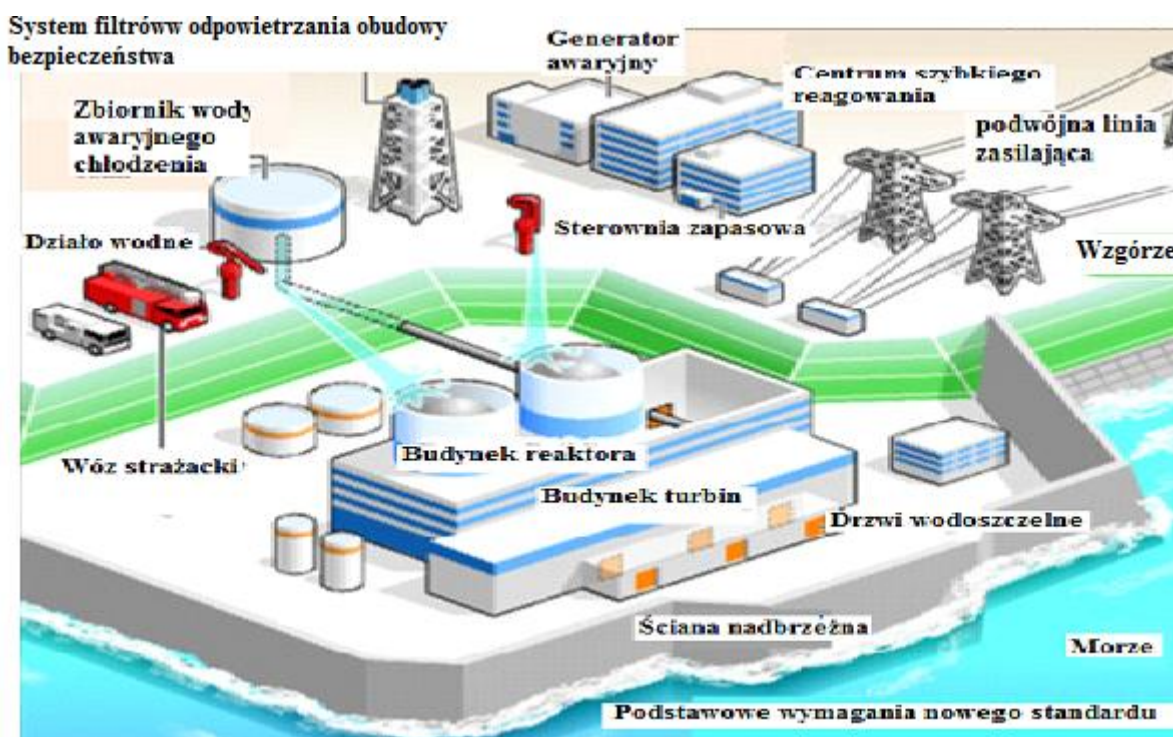
Źródło JAIF (DailyYomiuri, Asahi Shinbun)

Rys.28 Statystyki poparcia energetyki jądrowej (2011)

Obecnie przed Rządem Japonii stoi nowe, niezwykle trudne wyzwanie powtórzonego przekonania społeczeństwa do energetyki jądrowej. W celu zwiększenia akceptacji społecznej dla energetyki jądrowej powstała w listopadzie 2010 roku Japońska Organizacja Rozwoju Zasobów Ludzkich dla Energetyki (*Japan Nuclear Human resources Development Network – JN-HRD.Net*) zaktywizowała swoją działalność Zrzesza ona obecnie 75 organizacji. Celem

JN-HRD jest promowanie energetyki jądrowej dla jej pokojowego wykorzystania poprzez edukację poczynając od szkół podstawowych do wyższych (różnych specjalności), szkolenia, współpracę międzynarodową szczególnie z krajami wprowadzającymi energetykę jądrową, propagowanie wiedzy o technikach jądrowych itd.

Należy podkreślić, że ogrom prac organizacyjnych, naukowych (rozwiązanie problemu oczyszczania wody w elektrowni), technologicznych, legislacyjnych, oraz kontrolnych, który został wykonano od czasu awarii jest imponujący. Dyskutowana jest ustawa ograniczająca wydawanie licencji na eksploatację elektrowni jądrowej do 40 lat z ograniczoną możliwością przedłużenia. Po przeprowadzeniu wstępnych analiz (które są mimo upływu czasu stale prowadzone) opracowano podstawowe zasady zwiększenia bezpieczeństwa japońskich elektrowni jądrowych. Nowe standardy bezpieczeństwa uwzględniają w większym niż dotychczas stopniu odporność na zjawiska losowe: trzęsienia ziemi, tornada, pożary, wybuchy wulkanów jak i szczegółowe zalecenia dotyczące bezpieczeństwa na terenie obiektu jądrowego, zapobiegania uwalnianiu substancji promieniotwórczych do środowiska, zwielokrotniania systemów kontroli, sterowania itd. odporności działań terrorystycznych. Spełnienie tych warunków umożliwi ponowne uruchomienia wyłączonych obecnie reaktorów energetycznych.



Rys. 29 Podstawowe wymagania poprawy bezpieczeństwa elektrowni jądrowej wg. Nowych standardów (T. Hattori Seminarium TEPCO 19 Marzec 2014)

Rozpoczęto również kontrolę wszystkich japońskich elektrowni jądrowych. Kontrole mają być ukończone do końca marca 2012. W chwili obecnej z uwagi na ograniczoną liczbę pracujących reaktorów w niektórych rejonach odczuwane są braki energii.

Prowadzone są też dyskusje i wstępne prace nad uniezależnieniem się od energetyki jądrowej

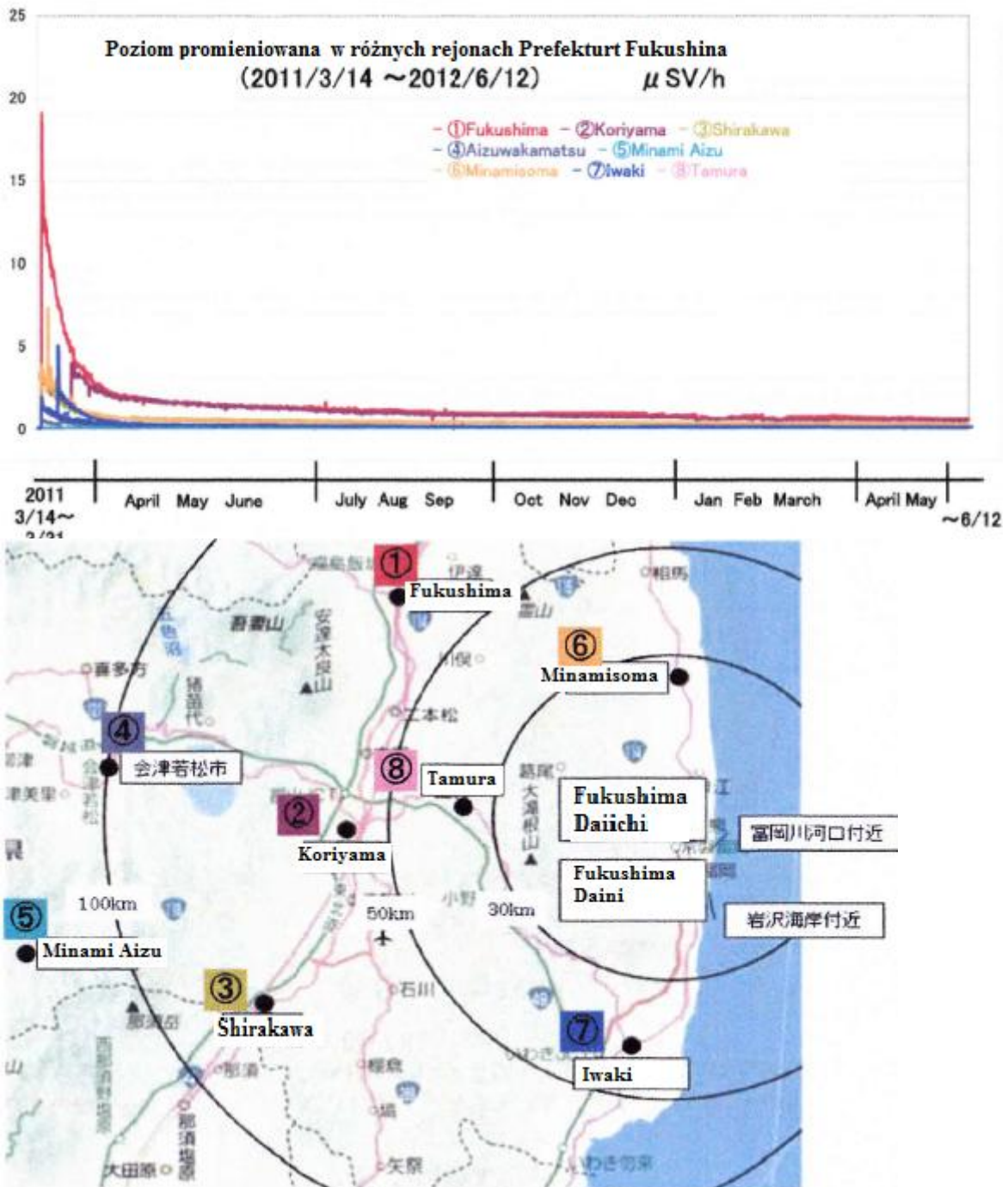


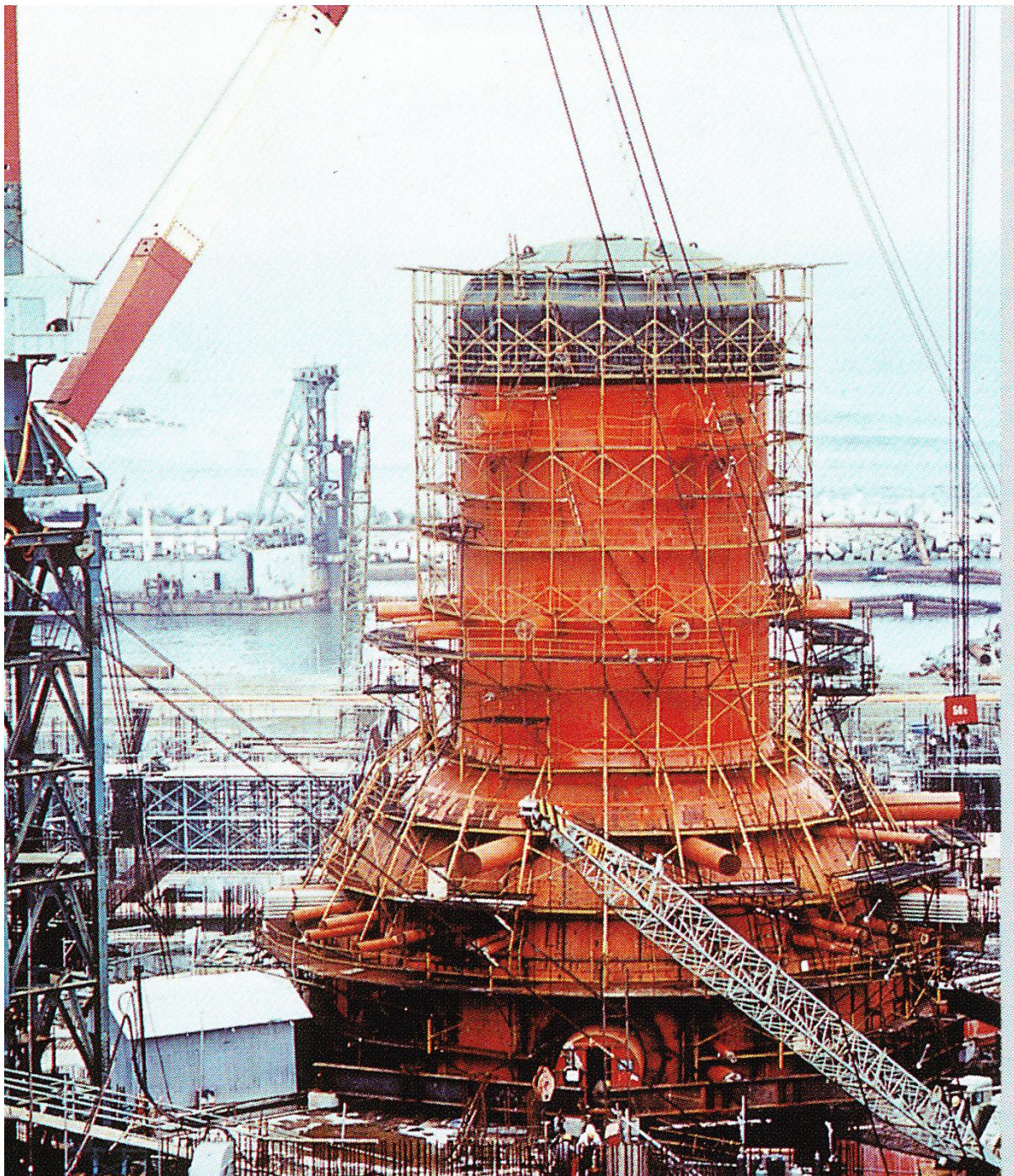
Wybrzeże, w Tamioce. Miejscowość położona pomiędzy elektrowniami jądrowymi Fukushima Daini i Fukushima Dichi (K. Rzymkowski)

Bibliografia;

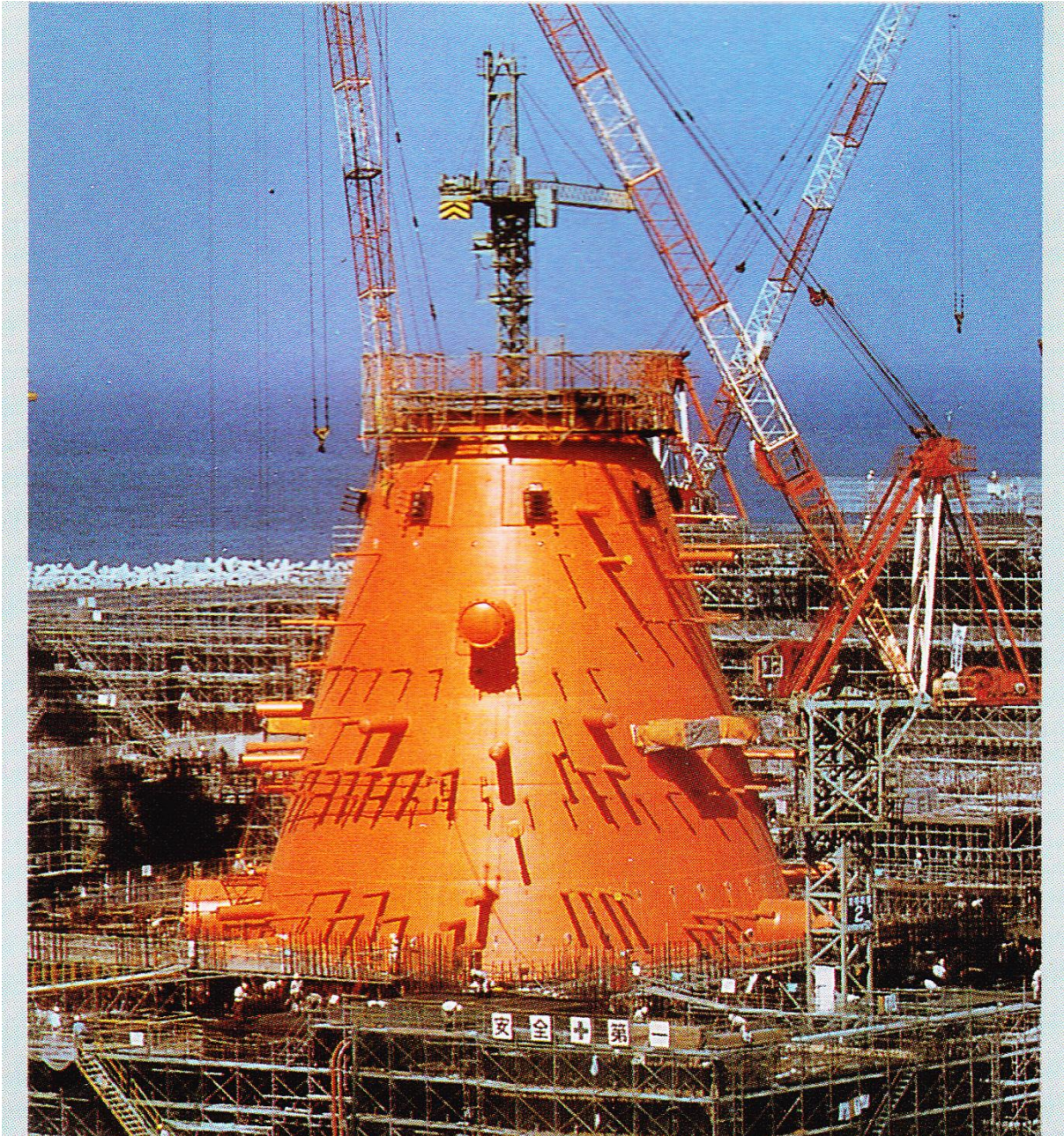
1. B. Dobrzańska G. Dobrzański D. Kielczewski, Ochrona środowiska przyrodniczego PWN Warszawa, 2009
2. David Lochbaum , Got Water Union Concerned Scientists , Citizens and Scientists for Environmental Solutions, Washington Oct 2007
3. Ex-skf.blogspot.com
4. Grażyna Zakrzewska-Trznadel, Procesy membranowe w technologiach jądrowych Raporty ICHTJ Seria A nr. 1/2006
5. Grzegorz Jeziński Energetyka Jądrowa wczoraj i dziś WNT 2005
6. IAEA Safety Guides Classification of radioactive Waste RADWASS Programme 1994
7. IAEA –TECDOC- 1336 , Combined methods for radioactive waste treatment, 2003
8. K. Rzymkowski, Fukushima Jeden Ekoatom Kwiecień -Maj Warszawa 2011 1/1
9. K. Rzymkowski, Postępowanie z odpadami ciekłymi w elektrowniach jądrowych PTJ 3/2011 Warszawa
10. K. Rzymkowski, Refleksje po Tsunami Ekoatom Lipiec- Sierpień Warszawa 2011 2/1
11. K. Rzymkowski, i Usuwanie skutków katastrofy ekologicznej wywołanej falą tsunami Ekoatom Luty-Marzec Warszawa 2012 4/1
12. K. Rzymkowski, Problemy oczyszczania wody podczas usuwania skutków awarii w elektrowni jądrowej Fukushima , PTJ, 2015
13. K. Rzymkowski, Energetyka Jądrowa Japonii PTJ 4/2008 Romuald Szymkiewicz, Dariusz Gąsiorowski , Podstawy hydrologii dynamicznej WNT Warszawa, 2010
14. R.O. Abgel Rachman, H.A. Ibrahim, Yung-Tse Hung, Liquid radioactive Wastes Treatments: A Review, Water 2011 www.mdpi.com/journal/water
15. V. M. Efremenkoy, Radioactive Waste Management at Nuclear Power Plants, IAEA Bulletin 4/1989
16. World Nuclear Association 2007 Nuclear Power In Japan
17. www.Ex-skfblogspot.com
18. www.guardian.co.uk

19. www.iaea.org 2011 03 29
20. www.neimagazine.com
21. www.tepco.co.jp 2011 03 26
22. Biuletyn Kansei Nuclear Power 1989
23. Biuletyn Kansei Nuclear Power 1990
24. Biuletyn Ohi Power Station 2003
25. Biuletyn Kashiwazaki Kariwa 2003
26. Foldery: Tokyo Electric Power Company, Tokyo 1-3 Uchisawaicho 1-Chome Chyoda-ku Fukushima Daichi Power Station, 22 Kitarhara Ottozawa Ohkuma-machi Futaba-gun Fukushima-ken
27. Raport IAEA 2008
28. Materiał Seminarium TEPCO 19 Marzec Warszawa

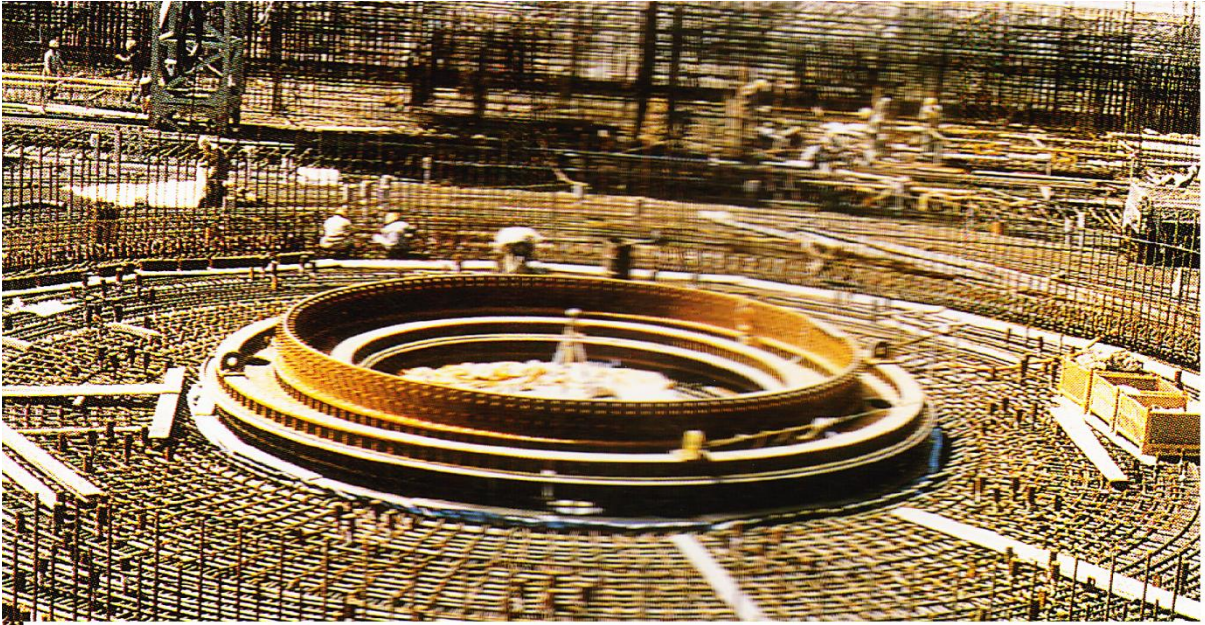




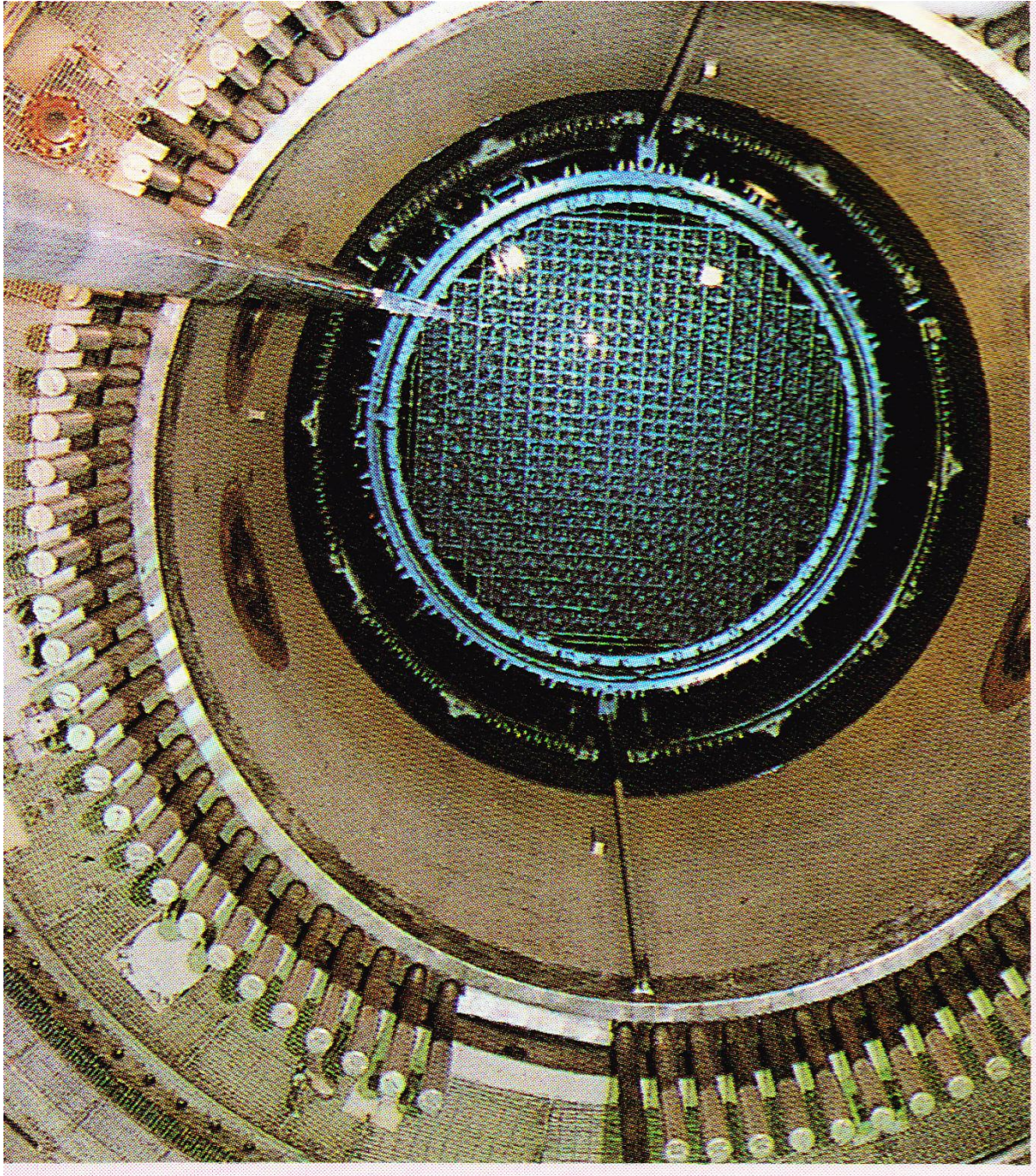
Budowa stalowej obudowy bezpieczeństwa Fukushima Daiichi Blok 1



Budowa stalowej obudowy bezpieczeństwa Reaktora Fukushima Daiichi Blok 6



Budowa fundamentów reaktora Fukushima Daiichi



Wymiana paliwa w rdzeniu



RESEARCH AND DEVELOPMENT ON NUCLEAR SHIP

Investigating a new power reactor for marine use



JAPAN ATOMIC ENERGY RESEARCH INSTITUTE

Doświadczalny state atomowy MUTSU