

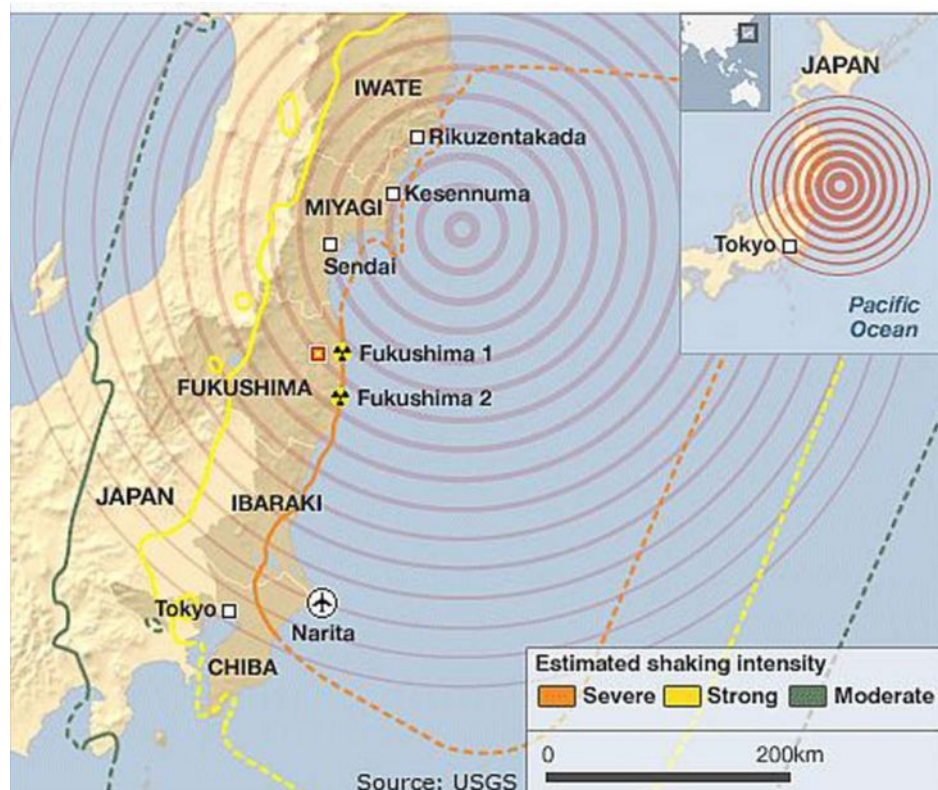
# JAPOŃSKA ELEKTROWNIA JĄDROWA FUKUSHIMA 1

\* SEKWENCJA ZDARZEŃ, KONSTRUKCJA I PARAMETRY REAKTORÓW \*

Jerzy Kubowski

Jedenastego marca 2011 r. w japońskiej elektrowni jądrowej, należącej do największych tego rodzaju elektrowni na świecie, wystąpiła ciężka awaria. Doszło do niej wskutek podwodnego trzęsienia ziemi o sile dziewięciu stopni i wywołanej nim oceanicznej fali - tsunami. W trzech blokach energetycznych nastąpiły wybuchy, stwierdzono stopienie się paliwa. Elektrownia została uszkodzona w stopniu uniemożliwiającym jej dalszą eksploatację. W promieniu dwudziestu kilometrów zarządzono ewakuację ludności.

Pod względem konstrukcyjnym i technologicznym elektrownia atomowa jest bardzo skomplikowanym przemysłowym obiektem. Niniejsze, z natury rzeczy skomprimowane opracowanie stanowi próbę popularnego objaśnienia jej budowy, funkcjonowania i sekwencji zdarzeń, które się bezpośrednio przyczyniły do zniszczenia. W tym celu min. szeroko posługiwano się ilustracjami.



**OBSZARY DOTKNIĘTE TRZĘSIENIEM ZIEMI**



Fot. 1. Widok elektrowni Fukushima 1 przed awarią<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Źródło:

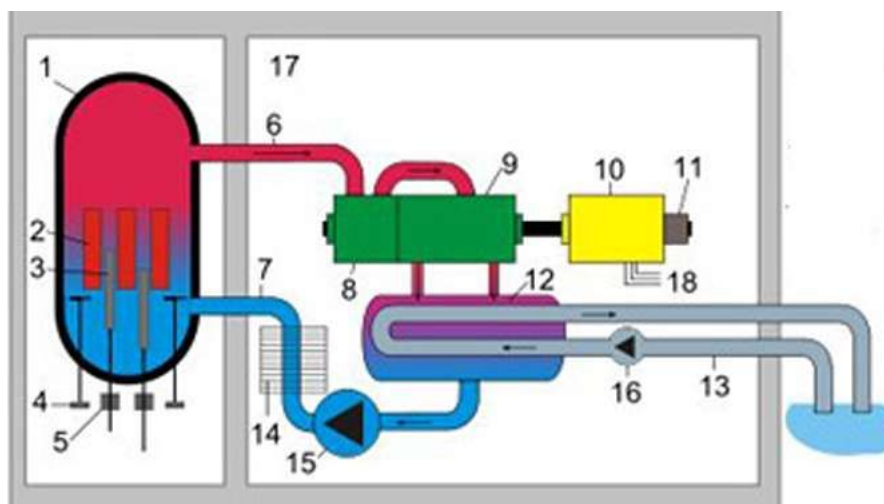
[http://www.google.com/imgres?imgurl=http://www.cbc.ca/gfx/images/news/photos/2011/03/14/li-fukushima-620-ap663.jpg&imgrefurl=http://www.cbc.ca/news/canada/windsor/story/2011/03/14/japan-nuclear-031411.html&usq=\\_\\_tgJNbeBjvObh4W2LV7QrBCFhgjA=&h=349&w=620&sz=31&hl=pl&start=12&zoom=1&tbnid=aDHP3AK59SIRfM:&tbnh=137&tbnw=211&ei=fx5\\_TZnxB6iJ4gb\\_642yCA&prev=/images%3Fq%3DNuclea%2Bpower%2Bplant%2Bfukushima%26um%3D1%26hl%3Dpl%26sa%3DN%26rls%3Dcom.microsoft:pl:IE-SearchBox%26rlz%3D1I7IRFC\\_pl%26biw%3D1008%26bih%3D601%26tbs%3Disch:10%2C781&um=1&itbs=1&iact=hc&vpx=683&vpy=128&dur=250&hovh=168&hovw=299&tx=147&ty=125&oei=Uh5\\_TbvsO82CswaLkrHsBg&page=2&ndsp=12&ved=1t:429,r:11,s:12&biw=1008&bih=601](http://www.google.com/imgres?imgurl=http://www.cbc.ca/gfx/images/news/photos/2011/03/14/li-fukushima-620-ap663.jpg&imgrefurl=http://www.cbc.ca/news/canada/windsor/story/2011/03/14/japan-nuclear-031411.html&usq=__tgJNbeBjvObh4W2LV7QrBCFhgjA=&h=349&w=620&sz=31&hl=pl&start=12&zoom=1&tbnid=aDHP3AK59SIRfM:&tbnh=137&tbnw=211&ei=fx5_TZnxB6iJ4gb_642yCA&prev=/images%3Fq%3DNuclea%2Bpower%2Bplant%2Bfukushima%26um%3D1%26hl%3Dpl%26sa%3DN%26rls%3Dcom.microsoft:pl:IE-SearchBox%26rlz%3D1I7IRFC_pl%26biw%3D1008%26bih%3D601%26tbs%3Disch:10%2C781&um=1&itbs=1&iact=hc&vpx=683&vpy=128&dur=250&hovh=168&hovw=299&tx=147&ty=125&oei=Uh5_TbvsO82CswaLkrHsBg&page=2&ndsp=12&ved=1t:429,r:11,s:12&biw=1008&bih=601)

## 1. PARAMETRY ELEKTROWNI I SCHEMAT DZIAŁANIA

Tabela 1. Parametry bloków energetycznych z reaktorami typu BWR

Blok	Początek eksploatacji	Moc elektryczna [MW]
Fukushima I – 1	26 marca 1971 r.	460
Fukushima I – 2	18 lipca 1974 r.	784
Fukushima I – 3 (paliwo: typu MOX)	27 marca 1976 r.	784
Fukushima I – 4	12 października 1978 r.	784
Fukushima I – 5	18 kwietnia 1978 r.	784
Fukushima I – 6	24 października 1979 r.	1,100

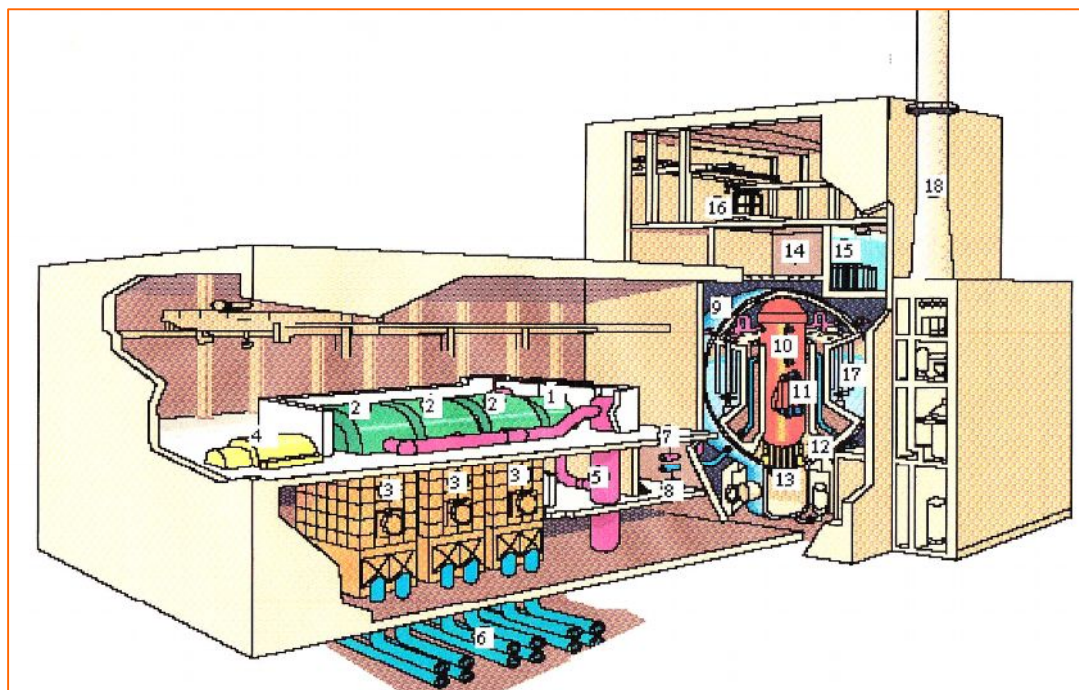
Uwagi do tabeli1: bloki 1 – 5 posiadają konstrukcję obudowy bezpieczeństwa typu Mark 1, blok 6– typu Mark II; MOX: paliwo uranowo – plutonowe (7% Pu / 93% U). Reaktor BWR – reaktor z wodą wrzącą (**B**oiling **W**ater **R**eaktor)



**Rys. 1.** Schemat działania elektrowni z reaktorem typu BWR (**B**oiling **W**ater **R**eaktor – reaktor wodny wrzący); oznaczenia: 1 – zbiornik ciśnieniowy reaktora, 2 – elementy paliwowe, 3 – pręty sterowania, 4 – obiegi wewnętrznej cyrkulacji chłodziwa, 5 – napędy prętów sterowania, 6 – para, 7 – dopływ wody zasilającej, 8 - wysokopiętna część turbiny, 9 - niskopiętna część turbiny, 10 – generator, 11 – wzбудnica generatora, 12 – skraplacz, 13 – dopływ wody chłodzącej, 14 – podgrzewacz, 15 – pompa zasilająca (cyrkulacyjna), 16 – pompa wody chłodzącej, 17 – hala turbogeneratora, 18 – kable elektryczne.

W reaktorach typu BWR woda spełnia rolę chłodziwa i moderatora neutronów. Elektrownia Fukushima pobierała ją z oceanu. W reaktorze zdeminalizowana woda ulega wrzeniu, a powstałą parę kieruje się bezpośrednio do napędu turbiny. Odpracowana para po schłodzeniu w skraplaczach, pod ciśnieniem 7,6 MPa w postaci kondensatu powraca do reaktora. Przy tym ciśnieniu wrzenie w rdzeniu reaktora następuje po osiągnięciu temperatury ok. 285 °C

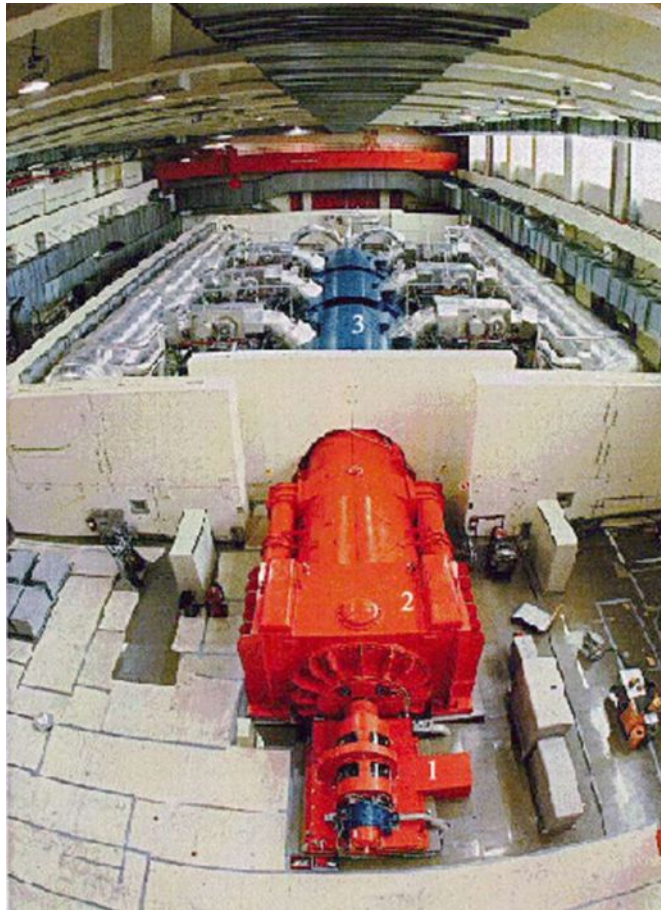
## 2. KONSTRUKCJA ELEKTROWNI



**Rys. 2.** Kompozycja elektrowni, oznaczenia: 1 – wysokoprężna część turbiny, 2 – niskoprężna część turbiny, 3 – skraplacze, 4 – generator, 5 – podgrzewacz międzystopniowy, 6 – układ wody chłodzącej, 7 – dopływ pary z reaktora, 8 – zapasowe zbiorniki wody, 9 – obudowa bezpieczeństwa (containment), 10 – ciśnieniowy zbiornik reaktora, 11 – rdzeń reaktora, 12 – pompy zasilające (cyrkulacyjne), 13 - system schładzania pary uwolnionej z reaktora (torus), 14 – pompy pomocnicze, 15 – basen przechowawczy paliwa wypalonego, 16 – most załadowczy – rozładowczy, 17 – awaryjny układ redukcji ciśnienia, 18 – komin wentylacyjny



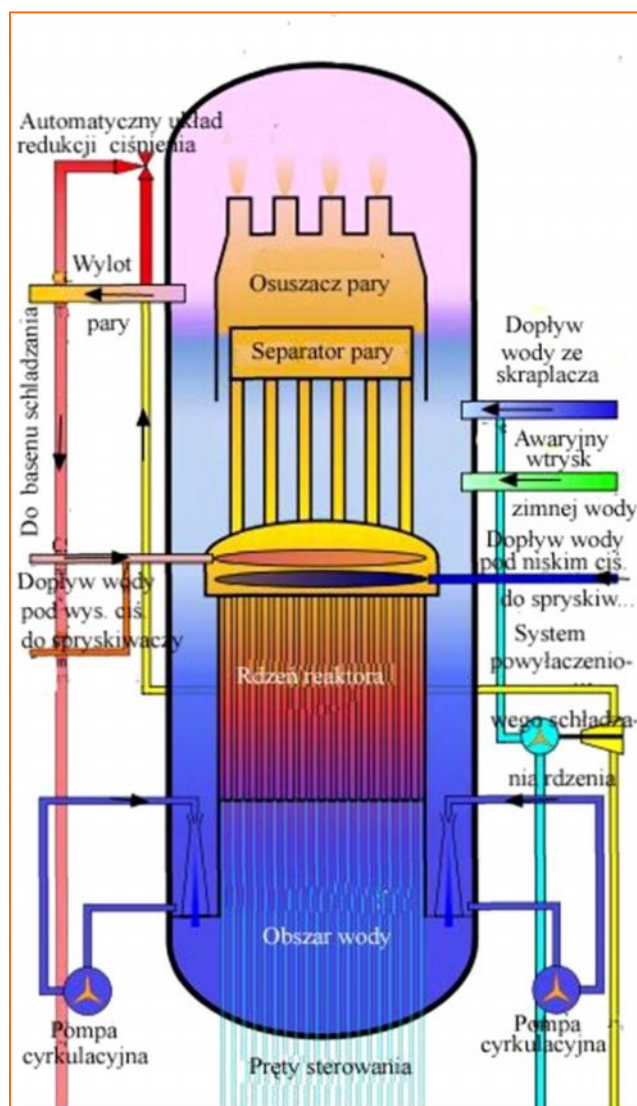
**Fot. 2.** Sterownia reaktora (źródło: <http://www.nucleartourist.com/images/cr-bnpp.jpg>)



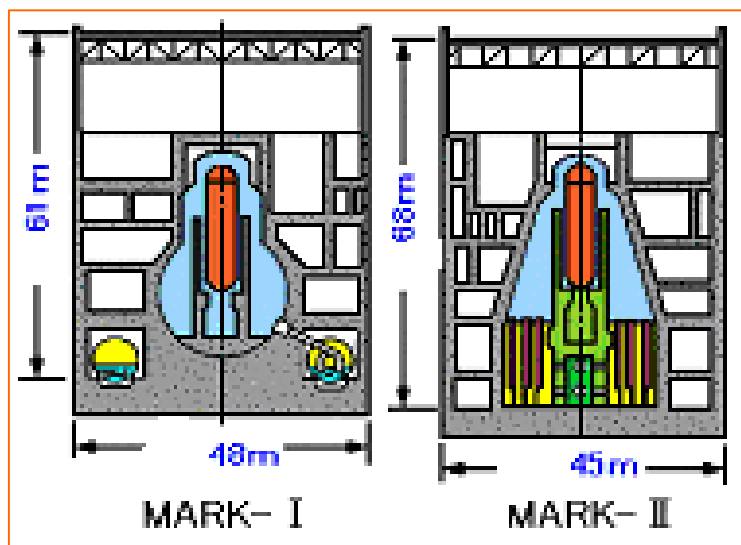
**Fot. 3.** Hala turbogeneradora; oznaczenia: 1 –wzbudnica, 2 – generator(20 kV), 3 – turbina<sup>2</sup>

---

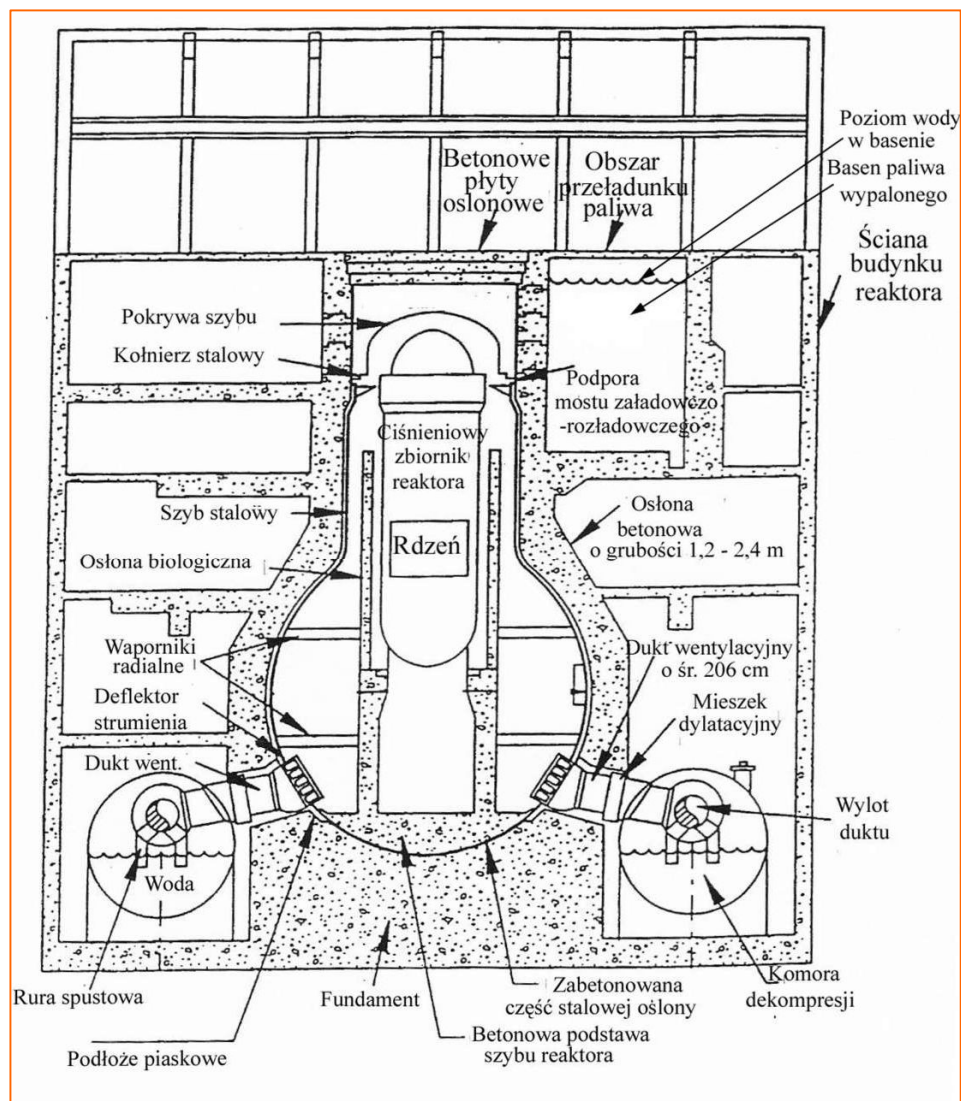
<sup>2</sup> Źródło: <http://www.nucleartourist.com/images/Bwrturb1.gif>



Rys. 3. Obiegi pary i wody w zbiorniku reaktora



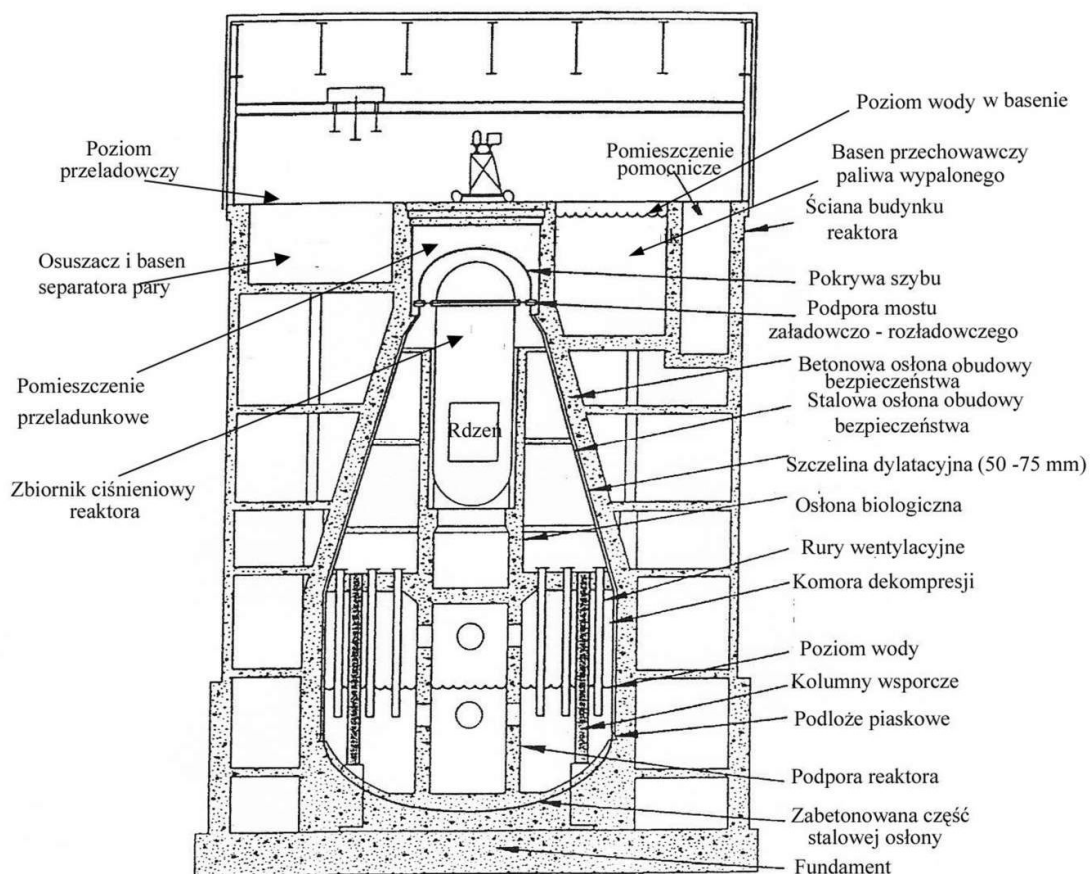
**Rys. 4.** Dwa typy obudów bezpieczeństwa stosowanych w elektrowni Fukushima 1



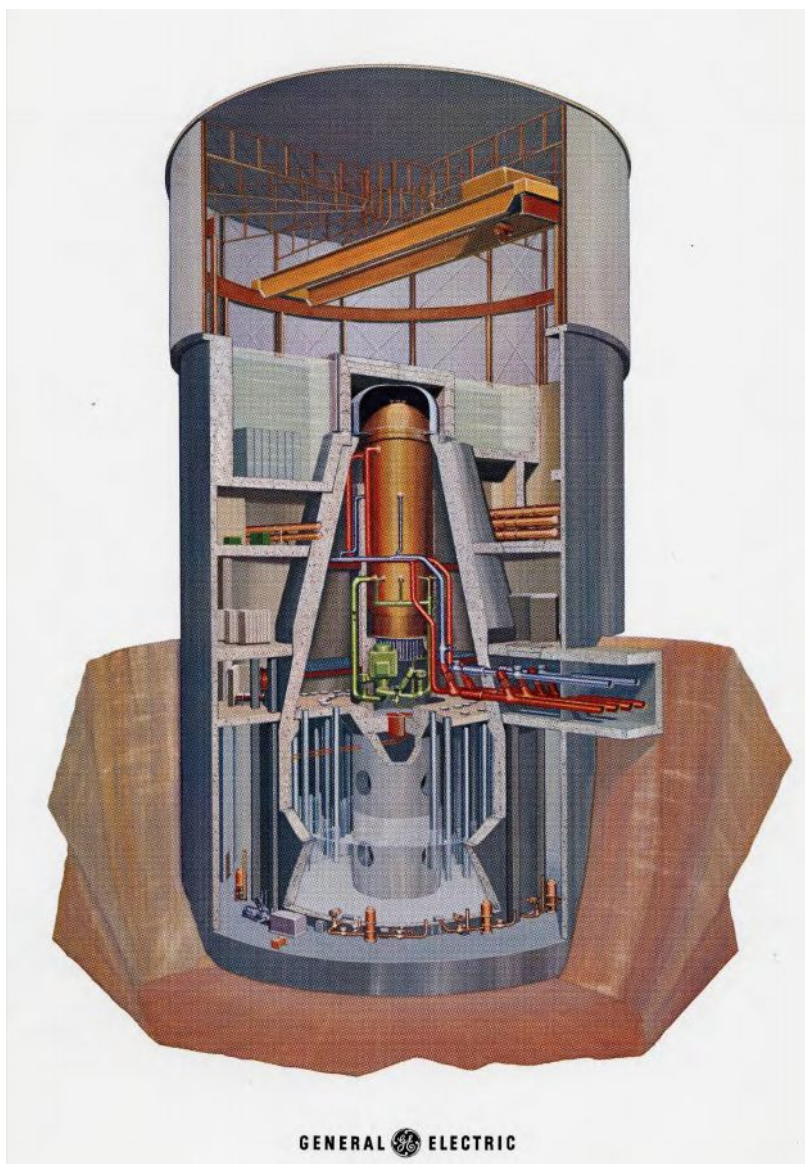
**Rys. 5.** Schemat rozmieszczenia urządzeń w budynku reaktora z obudowa bezpieczeństwa typu Mark I, grubość ścian zbiornika reaktora – 150 mm, grubość stalowej blachy (osłony) obudowy bezpieczeństwa – 2,54 cm, grubość żelbetonowej warstwy obudowy bezpieczeństwa – 1,2 – 2,4 m, grubość żelbetonowych ścian budynku: od 0,3 m do 1,0 m. Komora depresyjna (nazywana także basenem schładzania pary) w normalnych warunkach jest do połowy zalana wodą. W sytuacjach awaryjnych obudowa bezpieczeństwa jest w stanie wytrzymać nadciśnienie w zakresie 410 – 1400 kPa. (źródło: [http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te\\_1181\\_prn.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1181_prn.pdf))

Zwraca uwagę brak zbiornika retencyjnego do gromadzenia roztopionej masy rdzenia – corium. W reaktorach typu PWR III generacji urządzenie takie stanowi nieodłączną część systemu bezpieczeństwa. W przypadku stopienia się rdzenia (temperatura topnienia  $UO_2$  wynosi 2840 °C) i przetopienia się dna zbiornika reaktora, takie rozwiązanie zapobiega wylaniu się corium na płytę fundamentową i ewentualnie - do gruntu.





**Rys. 6.** Schemat rozmieszczenia urządzeń w budynku reaktora z obudową bezpieczeństwa typu Mark II. Należy ona do drugiej generacji containmentów. Jest w postaci ściętego stożka, posadowionego bezpośrednio nad cylindrycznego kształtu komorą dekompresji, oddzieloną od containmentu betonową płytą. Wentylacja wewnętrznej przestrzeni containmentu odbywa się za pośrednictwem kilku połączonych z komorą rur (źródło: [http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te\\_1181\\_prn.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1181_prn.pdf))



**Rys. 7.**Widok ogólny hali reaktora i obudowy bezpieczeństwa typu Mark II



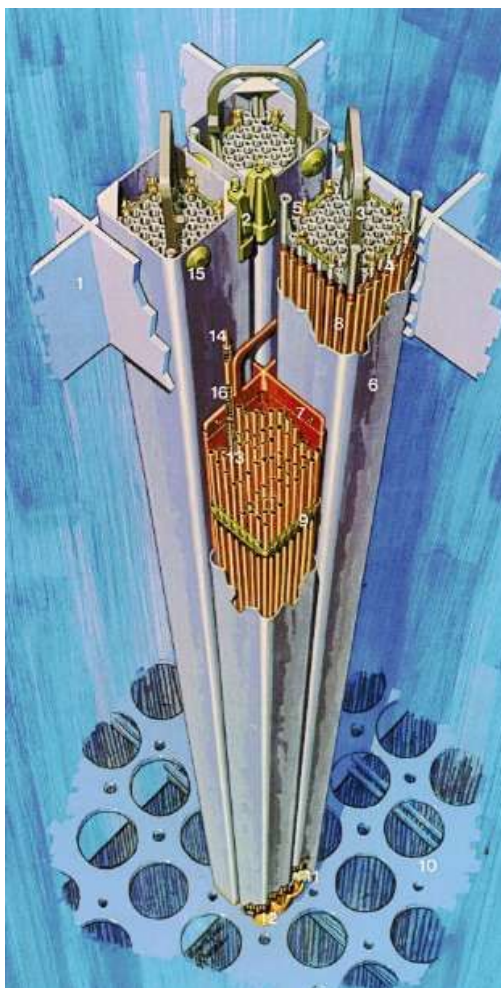
**Fot. 4.** Widok wentylacyjnego rurociągu łączącego wewnętrzną przestrzeń pod obudową bezpieczeństwa z torusem. Wokół obudowy bezpieczeństwa takich symetrycznie rozmieszczonych wentylacyjnych rurociągów jest od ośmiu do dziesięciu. Ich średnicy zawierają się w granicach od 1,7 m do 2,1 m.



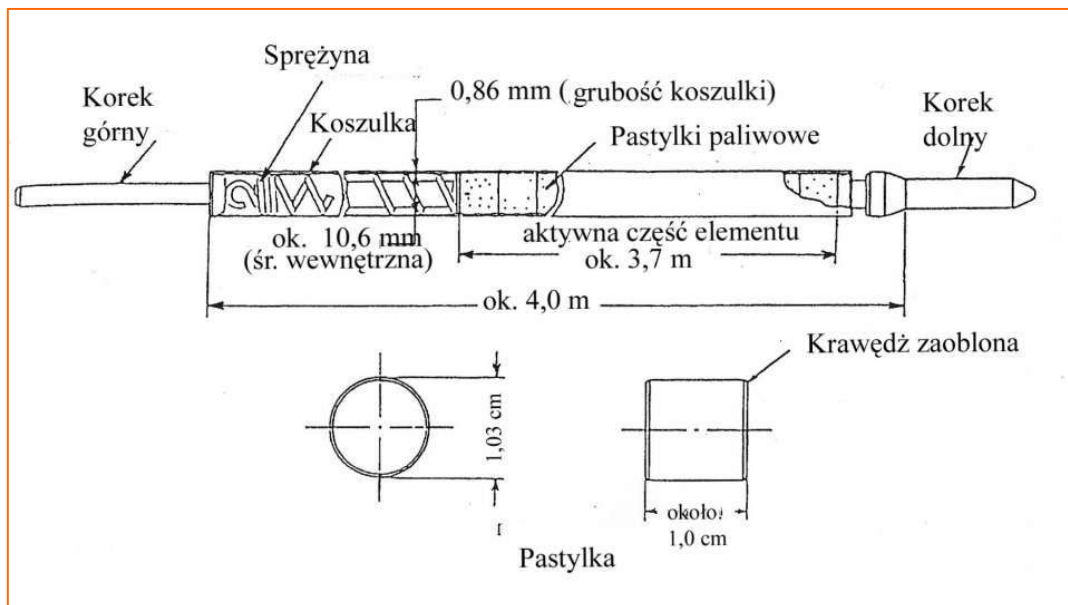
**Fot. 5.** Podnoszenie pokrywy szybu  
(źródło: <http://www.nucleartourist.com/images/headlift.jpg>)



**Fot. 6.** Basen przechowawczy paliwa wypalonego

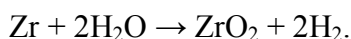


**Rys.8.** Kasetka paliwowa reaktora BWR, oznaczenia: 1 – górna prowadnica, 2 – obejmka mocująca, 3 – górna płyta wsporcza, 4 – sprężyna amortyzująca, 5 – górny zaczep, 6 – kanał, 7 – pręt sterowania, 8 – element paliwowy, 9 – płyta dystansująca, 10 – płyta reaktora, 11 – dolna płyta wsporcza, 12 – wspornik, 13 – pastylki paliwowe, 14 – korek, 15 – przegroda dystansująca kantal. Np. kasetka typu 8x8 składa się z 64 elementów paliwowych: Liczba kaset w rdzeniu reaktora wynosi 764, liczba elementów paliwowych - ok. 46 tys., masa paliwa – ok.160t. (źródło: <http://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/teachers/03.pdf>)

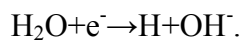


**Rys. 9.** Element paliwowy reaktora BWR. Pastylka paliwowa jest wykonana z dwutlenku uranu ( $\text{UO}_2$ ; temperatura topnienia: ok.  $2800\text{ }^\circ\text{C}$ ), a koszulka - z cyrkaloju, będącego stopem cyrkonu, niobu, cyny i innych materiałów w śladowych ilościach. Temperatura topnienia cyrkaloju wynosi ok.  $1800\text{ }^\circ\text{C}$ .

W wodzie chłodzącej reaktor, cyrkon ulega korozji wskutek reakcji:

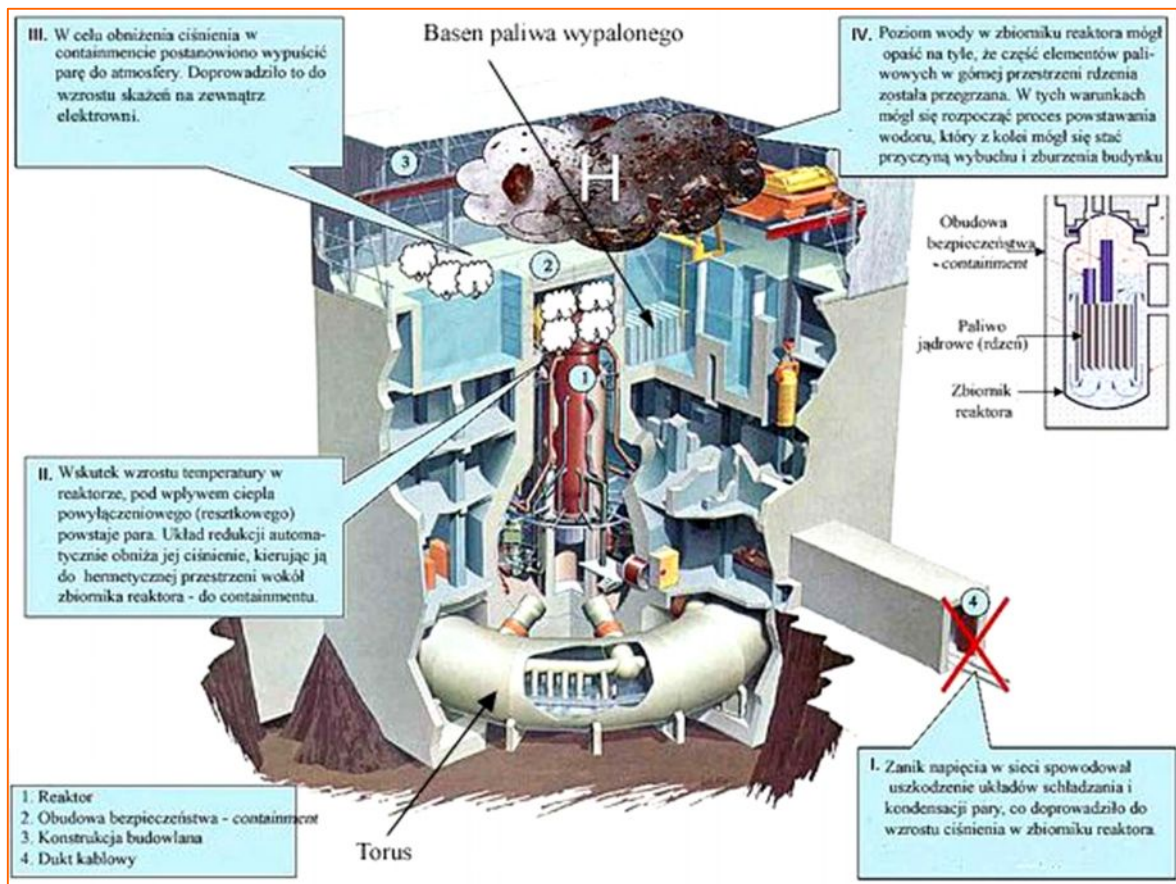


Mieszanka wodoru ( $\text{H}_2$ ) z powietrzem (w odpowiednich proporcjach) jest wybuchowa. Źródłem wodoru w reaktorze jest także reakcja radiolizy, jako skutek oddziaływania prędkich neutronów i kwantów gamma na molekuly wody. Reakcja rozkładu wody w efekcie pochłaniania przez nią wysokoenergetycznych elektronów ( $e^-$ ) jest następująca:



Oprócz tego, źródłem wodoru są także powstające niestabilne jony  $\text{H}_2\text{O}^+$ , które ulegają reakcji:  $\text{H}_2\text{O}^+ \rightarrow \text{H} + \text{OH}$

### 3. SEKWENCJA ZDARZEŃ



**Rys. 10.** Sekwencja wydarzeń w reaktorze, umieszczonym pod obudową bezpieczeństwa typu Mark I. Reaktor jest posadowiony w szybie; na zewnątrz obudowy bezpieczeństwa znajduje się toroidalna komora depresyjna (torus), przeznaczona do schładzania pary uwolnionej z reaktora wskutek redukcji ciśnienia, lub w przypadku uszkodzenia parowego rurociągu. W normalnych warunkach jest ona do połowy zalana wodą. Położony ponad reaktorem basen paliwa wypalonego posiada własny układ cyrkulacji wody chłodzącej. Jest niezbędny do odprowadzania ciepła generowanego w elementach paliwowych po ich usunięciu z reaktora. Początkowo wydziela się w nich ok. 7% ciepła, jakie powstawało podczas pracy w reaktorze; po 24 godzinach spada ono do ok. 0,3%, a po 100. dniach - do ok. 0,1%.

Rozwój zdarzeń był następujący:

1. Elektrownia została wyłączona dzięki zabezpieczeniom generującym sygnały od nastawionego poziomu siły sejsmicznych wstrząsów i zaniku napięcia w elektroenergetycznym systemie.
2. Automatycznie zadziałał system awaryjnego chłodzenia rdzenia (SACR), wspomagany pracą agregatów diesla.
3. Wskutek uszkodzenia zbiorników paliwa przez tsunami, po upływie około godziny agregaty diesla się wyłączyły. Bezpośrednim skutkiem tsunami było także zatopienie nadbrzeżnych pompowni wody chłodzącej.
4. Rozpoczęło się zasilanie SACR z baterii akumulatorów

Ponieważ dostatecznego chłodzenia nie udało się przywrócić, trwające w rdzeniu wrzenie chłodziwa spowodowało wzrost ciśnienia w zbiorniku reaktora. Układ redukcji ciśnienia automatycznie wypuścił nadmiar promieniotwórczej pary do obudowy bezpieczeństwa. Obawiając się, iż obudowa nie wytrzyma nadmiernego ciśnienia, postanowiono pewną ilość pary wypuścić do atmosfery, co doprowadziło do skażeń poza granicami elektrowni.

Przedłużający się okres braku chłodzenia spowodował częściowe „osuszenie” elementów paliwowych w rdzeniu i w basenie przechowawczym paliwa wypalonego. W rezultacie reakcji cyrkalojowych koszulek z parą wodną, gromadzenie się wodoru zostało zintensyfikowane, co stało się przyczyną wybuchu i zniszczenia ścian budynku.

Oficjalnych informacji o stanie rdzeni reaktorów nie ma. Jednakże na powierzchni gruntu stwierdzono skażenia promieniotwórczymi izotopami jodu - 131 i cezu - 137. Oba są produktami reakcji rozszczepienia. Ich obecność wskazuje, że doszło do uszkodzenia koszulek elementów paliwowych, a miarodajne źródła podają, iż nastąpiło także stopienia się paliwa.

#### **4. O DAWKACH PROMIENIOWANIA JONIZUJĄCEGO**

Człowiek w normalnych warunkach w ciągu roku otrzymuje przeciętnie dawkę promieniowania równą 2 milisiwerom (mSv/rok). Według informacji Państwowej Agencji Atomistyki, w dniu 20.03.2011 r. średnia moc dawki w Polsce wynosiła 0,0925  $\mu$ Sv/h (mikrosiwertów na godzinę). Na tej podstawie można powiedzieć, iż przeciętny mieszkaniec naszego kraju w ciągu roku otrzyma  $0,0925 \cdot 10^{-6}$  [Sv/h] x 8760 [h] =  $0,81 \cdot 10^{-3}$  [Sv] = 0,81 [mSv]. Wiadomo, że skutek jednorazowego otrzymania dawki o wartości 0,05 – 0,2 Sv zauważalne zdrowotne następstwa nie występują.

\* \* \*

Według informacji pochodzących z rosyjskiego koncernu ROSATOM, Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej (MAEA) jakiś czas temu zalecała elektrownię Fukushima 1 zamknąć. Eksperci MAEA zwracali uwagę na fakt, że dyrekcja elektrowni nie wzięła pod uwagę lekcji Czarnobyla i awarii amerykańskiej elektrowni TMI. MAEA przedstawiła wykaz zaleceń mogących podnieść bezpieczeństwo. Strona japońska oceniła, że ich wdrożenie będzie równoważne kosztom nowego bloku, i z modernizacji zrezygnowano.

21.03.2011