

# Projekt reaktora elektroenergetycznego AP1000

Bernd Doehnert  
*Westinghouse Electric Belgium*

**Słowa kluczowe:** AP1000, Pasywny, Korzyść

## Abstrakt

Przedstawione są szczególne rozwiązania zastosowane w zaawansowanym pasywnym reaktorze wodnym ciśnieniowym AP1000. W szczególności, pasywne rozwiązania bezpieczeństwa reaktora AP1000 przedstawione są wraz z wynikającym z nich uproszczeniem projektu budowy oraz eksploatacji, jak również wyraźnie zwiększonymi marginesami bezpieczeństwa, w porównaniu do obecnie pracujących reaktorów. Projekt AP1000 w sposób szczególny uwzględnia wiedzę nabytą w wyniku znacznej akumulacji doświadczenia eksploatacyjnego reaktorów energetycznych oraz wykorzystuje technikę probabilistycznej oceny ryzyka w procesie projektowania. Projekt AP1000 przeszedł przez proces zatwierdzenia w Amerykańskiej Komisji Dozoru Jądrowego (NRC) według przyjętych przez nią nowych zasad odnośnie licencjonowania nowych bloków jądrowych – *10 CFR Part 52*, a obecnie realizowanych jest sześć połączonych ze sobą wniosków o licencję na budowę i eksploatację. Obecnie projekt AP1000 przechodzi przez procedurę *EUR Rev C* dla nowych elektrowni jądrowych w Europie.

## Podstawy powstania projektu

Przez prawie dwie dekady Westinghouse dążył do zrealizowania projektu ulepszonego reaktora wodnego ciśnieniowego (PWR). W rezultacie tych dążeń powstał projekt AP1000 będący prostszym i bardziej ekonomicznym reaktorem typu PWR. Projekt zaczęto rozwijać w późnych latach 1980-tych jednocześnie z powstawaniem „dokumentu wymagań stawianych przez towarzystwa energetyczne zaawansowanym reaktorom lekkowodnym” (*Advanced Light Water Reactor Utility Requirements Document – URD*). Dokument URD, którego projekt powstał pod kierownictwem Instytutu Badawczego Elektroenergetyki (*Electric Power Research Institute – EPRI*) ukazuje politykę i wymagania projektowe amerykańskich towarzystw elektroenergetycznych wobec następnej generacji elektrowni jądrowych w USA. Wymagania te zostały również przyjęte przez Amerykańską Komisję Dozoru Jądrowego (*Nuclear Regulatory Commission - NRC*). W Europie odpowiadający mu dokument wymagań projektowych przyjął postać dokumentu: Wymagania Europejskich Towarzystw Energetycznych (*European Utility Requirements – EUR*). Zagadnienie to będzie przedstawione dalej w referacie.

Dokument URD dotyczy zarówno ewolucyjnych jak i pasywnych reaktorów lekkowodnych. Wymagania wobec każdej z tych kategorii są inne. Oczekiwania wobec projektów pasywnych reaktorów są znacznie wyższe. Istotnie, więcej powinno się oczekiwać wobec projektów, które nie ograniczają się do naśladowania istniejących modeli. Dla przykładu, oczekuje się, że projekty pasywne będą posiadały zdolność osiągnięcia i utrzymania stanu bezpiecznego wyłączenia reaktora przez 72 godziny bez konieczności interwencji operatora w razie wystąpienia awarii projektowej. Odpowiadający temu czas dla „ewolucyjnego” bloku jądrowego wynosi 30 minut do momentu wystąpienia konieczności interwencji operatora, zanim dojdzie do zagrożenia stopieniem rdzenia reaktora. Według definicji URD reaktor pasywny jest również „prostszy, mniejszy i znacznie ulepszony...”. Uproszczenie jest podstawowym wymogiem dokumentu URD i najważniejszą właściwością projektu AP1000.

## Ogólne wiadomości o AP1000

Projekt AP1000 opiera się na konwencjonalnej konfiguracji z 2 obiegami pierwotnymi i 2 wytwornicami pary, które udoskonalono pod względem wielu szczegółowych rozwiązań. Reaktor AP1000 posiada moc termiczną 3400 MWt w rdzeniu oraz w zależności od warunków lokalizacyjnych nominalną moc 1117 MWe. Rdzeń zawiera 157 elementów paliwowych podobnych do paliwa w elektrowniach jądrowych Doel 4 oraz Tihange 3. Projekt AP1000 zawiera układy pasywnego awaryjnego chłodzenia rdzenia reaktora oraz chłodzenia obudowy bezpieczeństwa. Oznacza to, że układy aktywne, które są potrzebne wyłącznie do zmniejszania skutków awarii projektowych, zostały zastąpione w AP1000 układami prostszymi, pasywnymi, których działanie opiera się na grawitacji, ciśnieniu sprężonych gazów lub naturalnej cyrkulacji zamiast użycia pomp. AP1000 nie wymaga również źródeł prądu przemiennego o jakości spełniającej wymagania stawiane układom bezpieczeństwa. Zapotrzebowanie na energię elektryczną na wypadek zrealizowania się nieprawdopodobnego scenariusza, w którym należałoby aktywnie napędzać pasywne układy bezpieczeństwa, jest zapewnione dzięki bateriom klasy 1E.

W porównaniu ze standardowym blokiem jądrowym o podobnej mocy, AP1000 ma o 35% mniej pomp, o 80% mniej przewodów rurowych związanych z bezpieczeństwem oraz o 50% mniej zaworów bezpieczeństwa klasy ASME. Nie są stosowane pompy w układach bezpieczeństwa. Te czynniki powodują, że AP1000 jest o wiele bardziej zwartym blokiem, w porównaniu z wcześniejszymi projektami. Skoro występuje mniej wyposażenia i rur, większość instalacji bezpieczeństwa mieści się wewnątrz obudowy bezpieczeństwa. Z tego powodu, AP1000 ma około 55% mniej rur przechodzących przez obudowę bezpieczeństwa, w porównaniu z blokami reaktorowymi obecnej generacji. Objętość budynków kategorii sejsmicznej I jest około 45% mniejsza w porównaniu z wcześniejszymi projektami o porównywalnej mocy. Na rysunku 1. jest pokazany zwarty blok AP1000, zaś na rysunku 2. jest porównany plan podstawowej zabudowy bloku elektrowni z obecnie pracującymi reaktorami typu PWR Budynki kategorii sejsmicznej I są pokazane z wytłuszczonymi konturami.

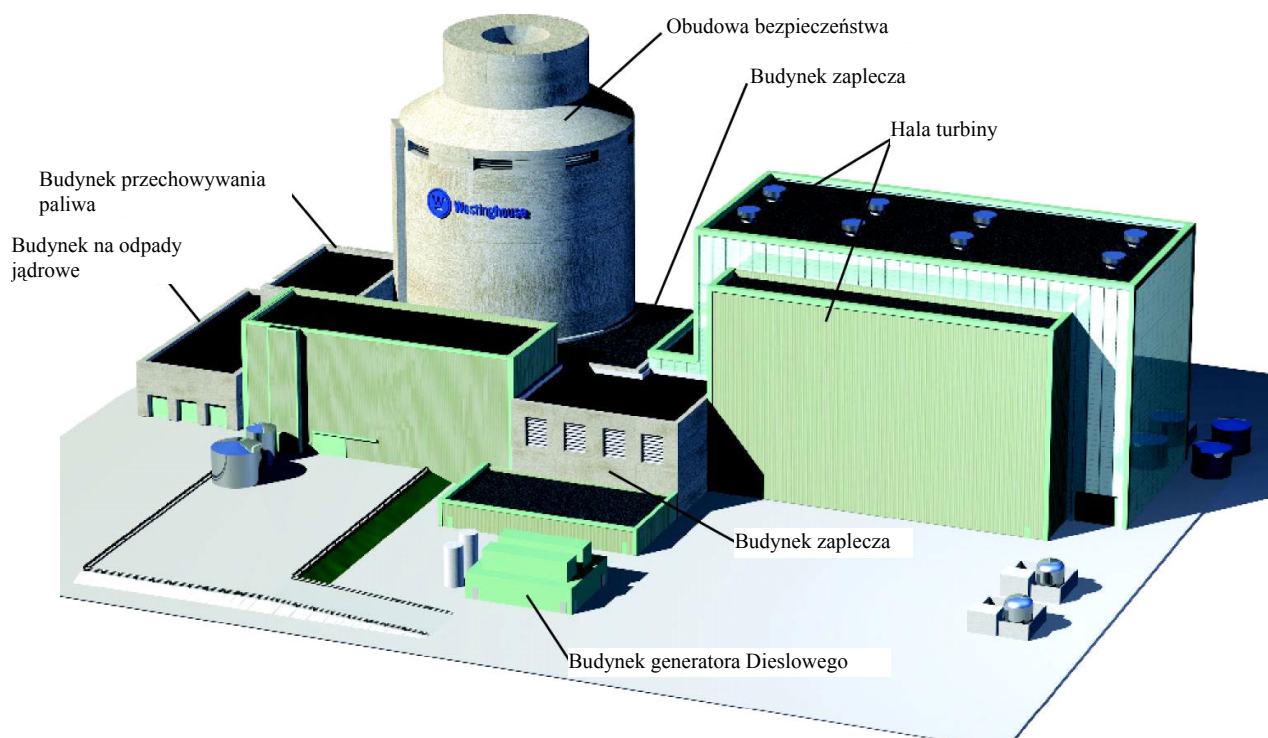
Poniżej jest pokazane porównanie marginesów bezpieczeństwa AP1000 z obecnie pracującymi blokami reaktorowymi.

	EJ w Watts Bar	AP1000
Margines do wystąpienia kryzysu wrzenia, utrata przepływu w %	14	16
Rozerwanie rurek wytwornic pary	Wymagany czas reakcji operatora – 15 minut	Reakcja operatora nie jest wymagana
Mała awaria utraty chłodziwa (LOCA), maksymalna temperatura w pastylkach paliwowych (PCT)	Pęknięcie 10 mm Rdzeń odkryty PCT = 608 °C	Pęknięcie 20 mm Rdzeń pozostaje zakryty
Duża awaria utraty chłodziwa, maksymalna temperatura w pastylkach paliwowych	977 °C	871 °C

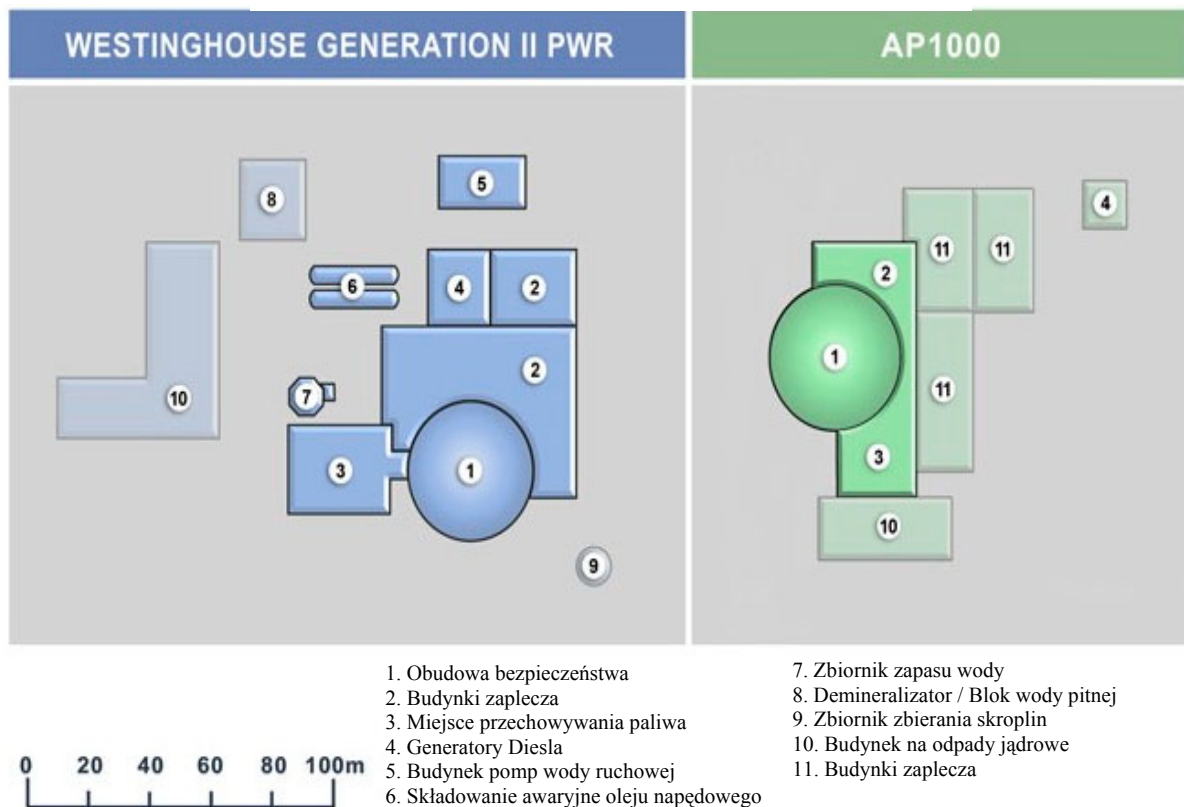
Ponieważ AP1000 posiada stosunkowo duży stabilizator ciśnienia, łatwiej się dostosowuje do stanów przejściowych i, wobec tego, jest bardziej wybaczący dla operatora.

AP1000 jest zaprojektowany w zgodności z zasadą utrzymywania „tak niską jak to jest rozsądnie osiągalne” (*ALARA – As Low As Reasonably Achievable*) dawki promieniowania dla pracowników. Rozwiązania takie, jak zintegrowany układ głowicy zbiornika reaktora, mający na celu szybką wymianę paliwa, skracają czas niezbędnej pracy zmniejszając

Rys. 1. Elektrownia AP1000



Rys. 2. Porównanie budynków kategorii sejsmicznej I



ekspozycję pracowników. Poświęcenie odpowiedniej uwagi osłonom, ustanowienie odpowiednich odległości od źródeł promieniowania, stosowanie stopów nisko kobaltowych oraz korzystanie ze zdalnie sterowanych narzędzi i układów kontroli, to podejścia, których celem jest zminimalizowanie ekspozycji pracowników na terenie całego bloku. W tym zakresie skorzystano w bardzo dużym stopniu z doświadczenia eksploatacyjnego.

Przed zagłębieniem się w dalsze szczegóły AP1000 oraz jego budowę, przedstawiony zostanie status regulacyjny tego projektu.

### **Status licencyjny i regulacyjny reaktora AP1000**

Elektrownie jądrowe obecnie pracujące w USA uzyskiwały licencję na podstawie przepisów prawa *10 CFR Part 50*. W 1989 r. Amerykańska Komisja Dozoru Jądrowego (NRC) ustanowiła nowe wymagania licencyjne – *10 CFR Part 52*. Przed rokiem 1989, gdy obowiązywały przepisy *10 CFR Part 50*, wszelkie aspekty procesu licencjonowania, począwszy od projektu układu wytwarzania pary, aż do zagadnień związanych z daną lokalizacją, pozostawały kwestią otwartą, aż do momentu wybudowania bloku. Dlatego wszystkie aspekty związane z aplikacją o licencję dla bloku jądrowego były nie ustalone i związane nimi ryzyko pozostawało aż do chwili gdy właściwie cały nakład inwestycyjny bloku nie został poniesiony. Obecne uregulowania – *10 CFR Part 52* umożliwiają rozwiązanie wszystkich ważnych problemów związanych z licencjonowaniem na wczesnym etapie tego procesu i z dużym poziomem pewności.

Według uregulowań *10 CFR Part 52*, projekt bloku reaktorowego może być przedłożony do NRC, w celu przeprowadzenia procesu zatwierdzenia. Wnioskodawcą jest organizacja firmująca projekt bloku, a zatwierdzanie ma charakter ogólny i jest niezależne od jakiegokolwiek lokalizacji. **NRC przyjęła projekt AP1000 oraz dokonała procesu jego zatwierdzenia** na podstawie przepisów *10 CFR Part 52* w grudniu 2005 r. Uzyskana licencja jest ważna przez okres 15 lat. Westinghouse przedłożył wniosek o zatwierdzenie projektu AP1000 w marcu 2002 r.

W podobny sposób, poszczególne lokalizacje mogą uzyskać ogólną zgodę na budowę bloku jądrowego na podstawie „wczesnego zezwolenia lokalizacyjnego” (*Early Site Permit*), które wypływa z przepisów *10 CFR Part 52*. To zezwolenie obejmuje wszystkie czynniki wpływające na przydatność danej lokalizacji, za wyjątkiem efektów specyficznych wynikających z konkretnego projektu bloku reaktorowego. Te zezwolenia są ważne przez okres od 10 do 20 lat i mogą być przedłużone na dalsze 10 do 20 lat. Pierwsze takie „wczesne zezwolenie lokalizacyjne” zostało przyznane dla Exelon w lokalizacji Clinton.

W sytuacji gdy projekt został przyjęty i przeszedł przez procedurę zatwierdzania oraz gdy jest lokalizacja, która uzyskała zezwolenie, należałoby je połączyć aby przejść do etapu budowy i eksploatacji określonego bloku jądrowego w określonej lokalizacji. Tym połączeniem jest łączny wniosek o licencję na budowę i eksploatację (*Construction and Operating Licence – COL*). Wniosek do NRC składa właściciel danej lokalizacji. Z chwilą gdy NRC udzieli licencję COL można rozpocząć budowę.

Pozostaje jeszcze ostatni etap procesu licencjonowania, którym jest procedura zweryfikowania czy blok został wybudowany i będzie pracował zgodnie z wcześniej udzieloną licencją COL. Jest to realizowane zgodnie z kryteriami inspekcji, testów i akceptowalności (*Inspection, Tests, And Acceptance Criteria – ITAAC*). Szczegółowe wymagania ITAAC dla danego przypadku są ustanawiane w trakcie licencjonowania, z

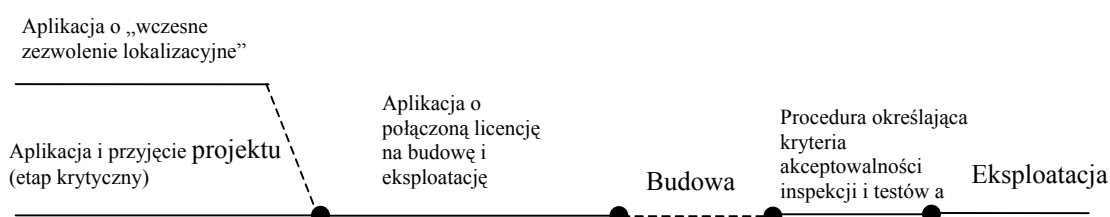
uwzględnieniem treści wniosków o finalne zatwierdzenie projektu (*Final Design Certification*) i COL.

Na rysunku 3. przedstawiono podsumowanie tych procedur oraz wyróżniono amerykańskie towarzystwa energetyczne, które zadeklarowały, że będą zmierzać do złożenia wniosku o udzielenie COL. Wobec tego, że projekt reaktora AP1000 przeszedł już przez procedurę zatwierdzania, przygotowanie aplikacji o licencję COL w oparciu o projekt AP1000 może się odbywać bezpośrednio.

### Rysunek 3.

#### Status licencyjny i regulacyjny

- ◆ 10 CFR Part 52 (pracujące bloki wcześniej były licencjonowane zgodnie z 10 CFR Part 50)
- ◆ Rozwiązanie kwestii związanych z uzyskaniem licencji na wczesnym etapie i z dużym poziomem finalnej pewności



- ◆ AP1000 jest jedynym projektem bloku reaktorowego nowej generacji, który przeszedł przez procedurę zatwierdzania NRC
- ◆ Towarzystwa, które zadeklarowały zamiar uzyskania licencji COL

- |                         |                        |
|-------------------------|------------------------|
| 1. NUSTART (ESBWR)      | 2. NUSTART (AP1000)    |
| 3. Duke (AP1000)        | 4. Constellation (EPR) |
| 5. Progress #1 (AP1000) | 6. Entergy (ESBWR)     |
| 7. Progress #2 (AP1000) | 8. Spouthern (AP1000)  |
| 9. Dominion (ESBWR)     | 10. SCANA (AP1000)     |

- ◆ Realizacja wniosku o udzielenie licencji COL w latach 2007-2008

#### Pasywne układy bezpieczeństwa AP1000

Z niniejszymi rozważaniami łączy się pytanie co należy rozumieć przez pojęcie pasywnych układów bezpieczeństwa, które są podstawową cechą rozwiązań zastosowanych w projekcie AP1000. Na początku przedstawione zostaną układy awaryjnego chłodzenia rdzenia reaktora. Te układy zostają uruchomione jedynie podczas stanów przejściowych i awarii, które nie mogą być opanowane na pierwszej linii obrony, tj. przez układy nie zaliczane do układów bezpieczeństwa. W obecnie pracujących blokach drugiej generacji, układy bezpieczeństwa awaryjnego chłodzenia rdzenia reaktora składają się z powielonych układów zasilania w wodę, wysokiego i niskiego ciśnienia, pracujących w oparciu o pompy. Te pompy wprowadzają wodę do obiegu pierwotnego, w celu uzupełnienia chłodziwa w rdzeniu na wypadek awarii utraty chłodziwa. Takie układy opierające się na działaniu pomp są nazywane układami aktywnymi. Pompy pobierają chłodziwo w postaci wodnego roztworu boru ze zbiorników, zawory zostają otwarte, a roztwór jest wprowadzany do zbiornika reaktora, w celu podtrzymania chłodzenia prętów paliwowych. Aby zwiększyć niezawodność, można zainstalować kilka wzajemnie rezerwujących się ciągów takich układów. W rezultacie mamy

dużą liczbę instalacji gotowych do zadziałania, a projektanci i operatorzy robią wszystko aby nigdy nie wystąpiła konieczność ich wykorzystania.

W przeciwieństwie do tego, pasywne układy chłodzenia rdzenia reaktora AP1000 wykorzystują ułożone hierarchicznie w piętra zbiorniki roztworu boru, które zaprojektowano tak, aby zasilaly zbiornik reaktora przy różnych ustalonych stanach awaryjnych w obiegu pierwotnym. Na rysunku 4. pokazana jest konfiguracja obiegu pierwotnego reaktora AP1000. Na rysunku 5., zaś, pokazane są główne składniki pasywnego awaryjnego układu chłodzenia rdzenia reaktora. W reaktorze AP1000 zastosowano trzy źródła zastępczego chłodziwa w postaci roztworu boru oraz trzy różne mechanizmy wyzwalaające jego zasilanie:

1. Dwa zbiorniki wyrównujące poziom wody w rdzeniu (zwane *core makeup tanks* – CMT). Każdy zbiornik CMT, w jego szczytowej części, jest bezpośrednio połączony z zimną gałęzią obiegu pierwotnego reaktora (*reactor coolant system* – RCS), jak pokazano na rysunku. W sytuacji, gdy zawory odcinające są zamknięte, układy nie pracują. Gdy zawory odcinające i zawory zwrotne zostaną otwarte, woda musi wypłynąć z tych zbiorników CMT do zbiornika reaktora, co jest uzależnione od warunków panujących w zimnej gałęzi obiegu pierwotnego, dzięki stale otwartemu ww. połączeniu. Woda z zimnej gałęzi obiegu pierwotnego, która jest gorętsza od wody zawartej w zbiornikach CMT wymusza zasilanie dzięki swojej ekspansji w zbiornikach CMT. W sytuacji gdy zimna gałąź obiegu pierwotnego jest pełna pary, to para ta wymusza zasilanie. Zbiorniki CMT uruchamiają się jako pierwsze, gdy wystąpi mały wyciek z obiegu pierwotnego.
2. Dwa hydroakumulatory (ACC). Te sferyczne zbiorniki są wypełnione w 85% roztworem boru i panuje w nich, wytworzone przez zastosowanie azotu, ciśnienie 49 ata. Zawory zwrotne otwierają się gdy nadciśnienie w zbiorniku reaktora spada poniżej 49 ata co umożliwi wypłynięcie wody do zbiornika reaktora. W sytuacji dużych awarii utraty chłodziwa (LOCA), które skutkują szybką utratą ciśnienia, te hydroakumulatory pierwsze zareagują.
3. Umieszczony wewnątrz obudowy bezpieczeństwa zbiornik rezerwowy wody (*in containment refueling water storage tank* – IRWST). Umieszczony powyżej przewodów układu pierwotnego chłodzenia reaktora (RCS), system IRWST, dzięki grawitacji, będzie zasilal zbiornik reaktora, w sytuacji gdy w obiegu pierwotnym RCS spadnie ciśnienie na skutek jego rozerwania lub zadziałania automatycznego układu zmniejszania ciśnienia, co również jest pokazane na rysunku 5. Wypływ wody jest zapoczątkowywany przez sygnał o spadku ciśnienia, który otwiera zawory pracujące w oparciu o zastosowanie ładunków wybuchowych. Zawory te ustawione są szeregowo z zaworami zwrotnymi.

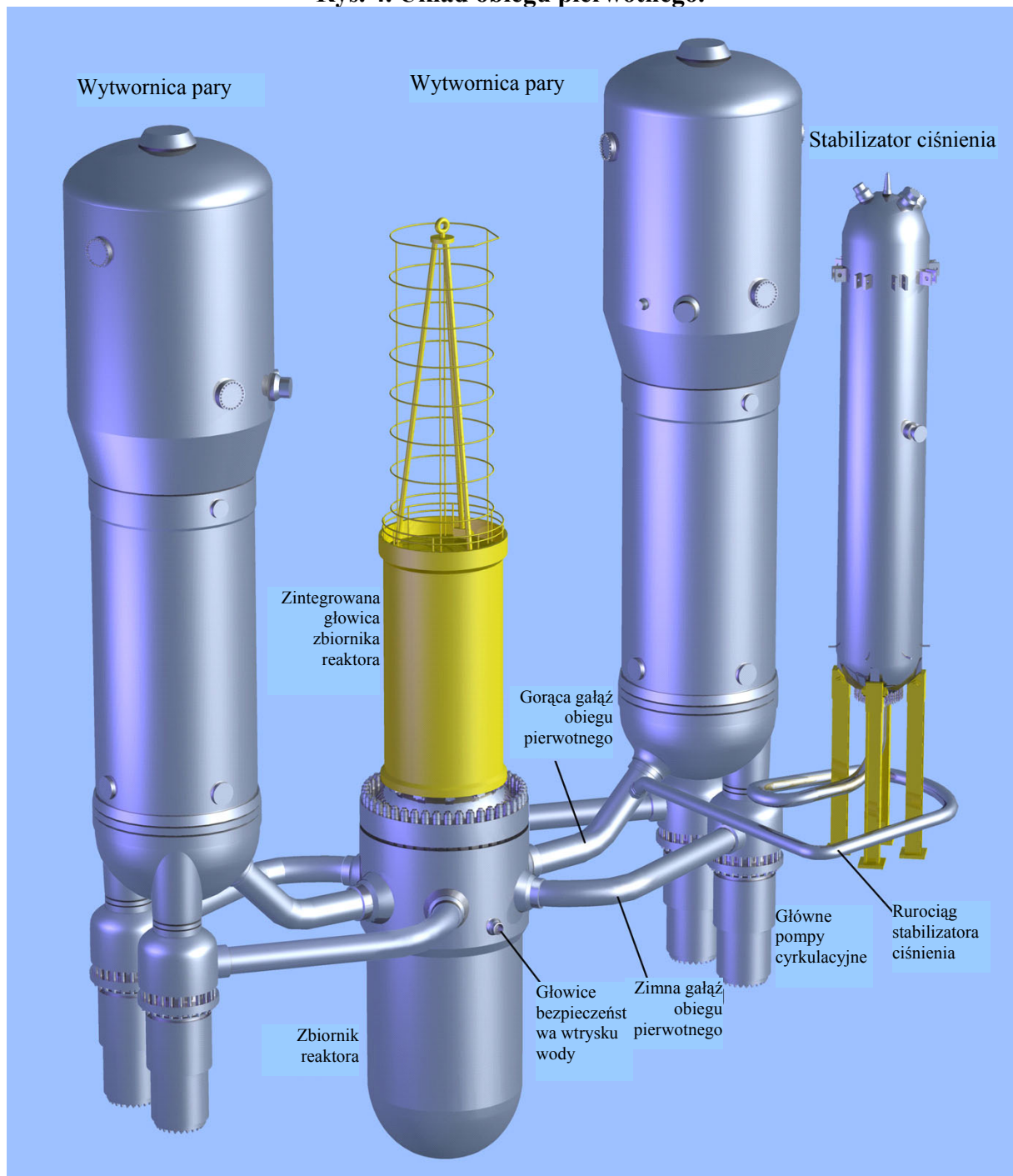
Wymienione wyżej źródła zasilania są połączone z dwiema, przeznaczonymi wyłącznie do tego celu, dyszami bezpośredniego wtrysku na zbiorniku reaktora. Wszystkie składniki pasywnych układów awaryjnego chłodzenia reaktora znajdują się wewnątrz obudowy bezpieczeństwa. Ponieważ nie ma pomp, które trzeba by zasilac w energię elektryczną, nie występuje zapotrzebowanie na awaryjne źródło prądu przemiennego, mające zapewnić ich funkcjonowanie w razie awarii. Zasilanie w energię elektryczną nielicznych zaworów bezpieczeństwa i urządzeń uruchamiających opiera się na prądzie stałym pochodzącym z baterii klasy 1E.

Układ wtrysku wody jest uruchamiany przez automatyczny układ obniżania ciśnienia, który etapowo obniża ciśnienie w obiegu pierwotnym, co następuje na skutek jakiegokolwiek zadziałania układu zbiorników CMT, które doprowadzi do przekroczenia ustalonego poziomu wody w tych zbiornikach.

Zbiornik IRWST stanowi część pasywnego układu usuwania ciepła powyłaczeniowego. Wymiennik ciepła wewnątrz IRWST jest połączony przewodem doprowadzającym z gorącą gałęzią obiegu pierwotnego (RCS) oraz przewodem odprowadzających z zimną gałęzią

obiegu pierwotnego. Na wypadek utraty chłodzenia obiegu pierwotnego RCS w wytwornicach pary, zbiornik IRWST może pochłaniać ciepło z wymiennika ciepła, a chłodziwo z obiegu pierwotnego przepływać będzie przez wymiennik dzięki naturalnej cyrkulacji. Para powstała w zbiorniku IRWST będzie się skraplać na ścianach obudowy bezpieczeństwa. Skropliny, są zbierane przez awaryjny układ zbierania skroplin i z powrotem kierowane do zbiornika IRWST, co podtrzymuje jego cykl pracy.

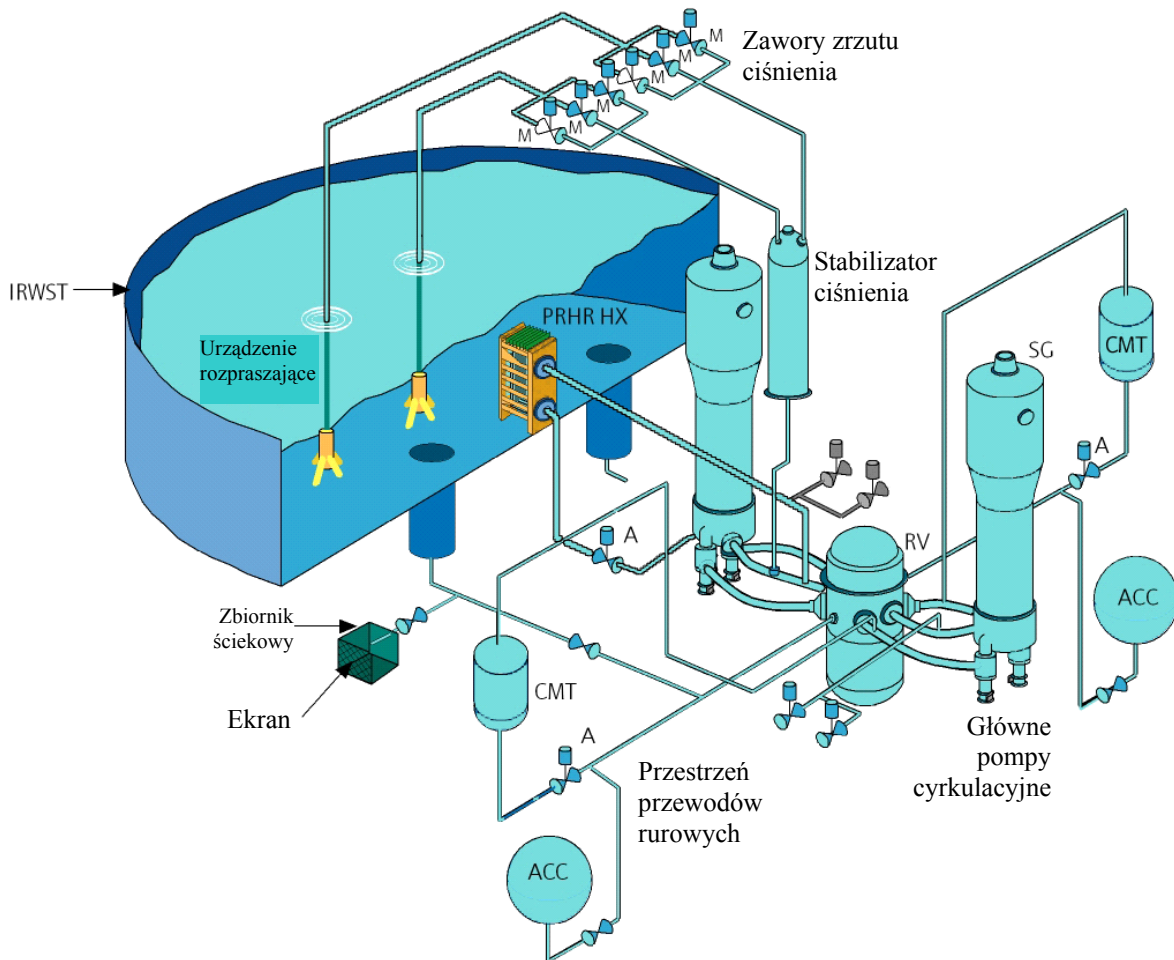
**Rys. 4. Układ obiegu pierwotnego.**



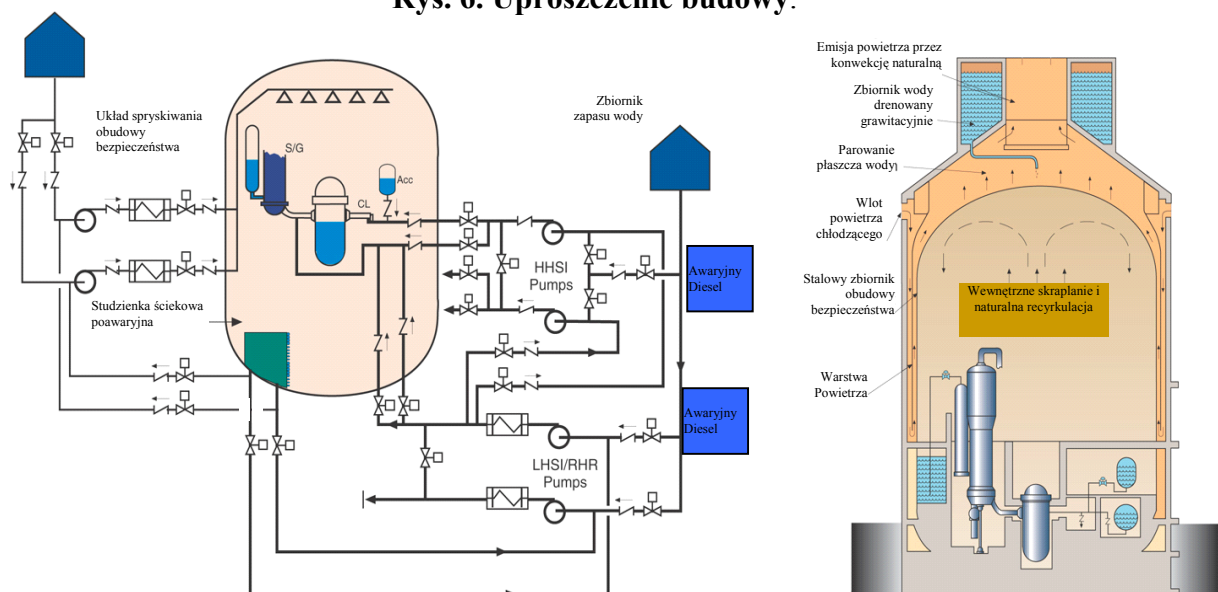
Stalowy zbiornik obudowy bezpieczeństwa, umieszczony wewnątrz betonowej ściany obudowy bezpieczeństwa, umożliwia odprowadzanie ciepła przez jego powierzchnię, z wnętrza obudowy bezpieczeństwa do atmosfery. Ciepło jest odprowadzane z powierzchni stalowego zbiornika obudowy bezpieczeństwa dzięki stałej naturalnej cyrkulacji powietrza w przestrzeni pomiędzy tym zbiornikiem a betonową ścianą obudowy bezpieczeństwa. Na wypadek wystąpienia awarii projektowej, chłodzenie powietrza jest zapewnione przez

odparowanie wody. Ta woda chłodząca sływa grawitacyjnie ze zbiornika umieszczonego na szczycie budynku obudowy bezpieczeństwa. Woda ścieka w dół po powierzchni stalowego zbiornika obudowy bezpieczeństwa ułatwiając wymianę ciepła. Ten pasywny układ chłodzenia obudowy bezpieczeństwa likwiduje konieczność stosowania awaryjnych urządzeń spryskujących i wentylatorowych, które są niezbędne w konwencjonalnym bloku reaktorowym.

**Rys. 5. Układ pasywnego chłodzenia rdzenia AP1000.**



**Rys. 6. Uproszczenie budowy.**



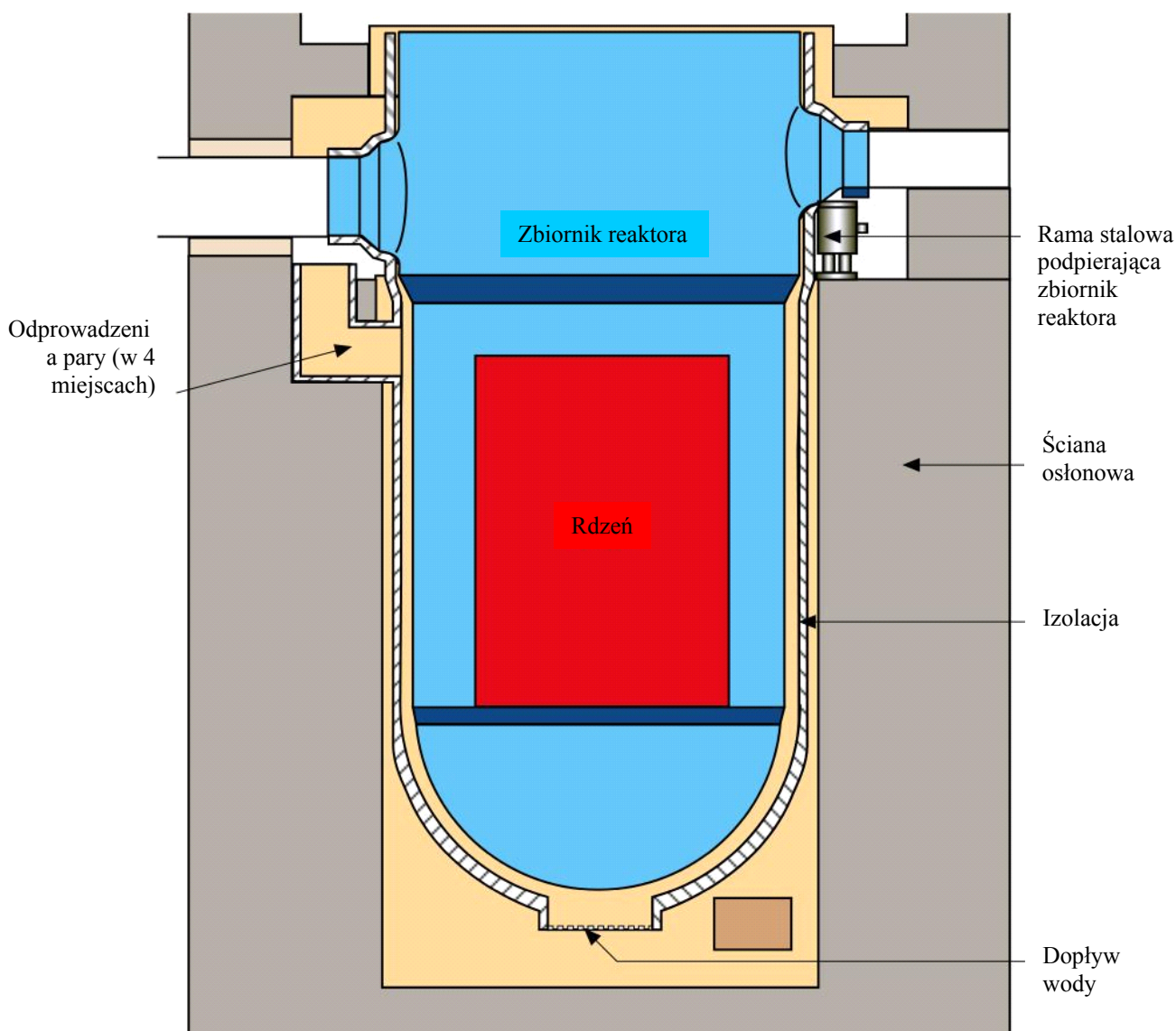


Kluczowe elementy tego systemu były szeroko testowane i sporządzono ich dokumentację jako podstawę do przeprowadzenia procesu finalnego zatwierdzenia projektu przez NRC (uzyskania dokumentu *Final Design Certification*). Na rysunku 6. pokazano uproszczenia wynikające z zastosowania pasywnych układów AP1000 i porównano je do standardowych układów awaryjnych w reaktorach typu PWR.

### Przeciwdziałanie poważnym awariom

Reaktor AP1000 został zaprojektowany w taki sposób, aby zatrzymać materiał stopionego rdzenia reaktora wewnątrz zbiornika reaktora. W pierwszym rzędzie, zbiornik reaktora nie ma otworów w swej dolnej części. Na wypadek wystąpienia poważnej awarii, woda z dużego zbiornika IRWST może być wykorzystana do zalania studni reaktora i chłodzenia zewnętrznej powierzchni zbiornika reaktora. Układ ten jest pokazany na rysunku 7. Specjalnie zaprojektowana izolacja zbiornika reaktora tworzy przestrzeń pierścieniową pomiędzy nią a zbiornikiem, umożliwiając wodzie chłodzącej bezpośredni kontakt z powierzchnią zbiornika. Zaprojektowano ujścia dla pary powstającej w tej przestrzeni. Tak powstała para skrapla się na powierzchni obudowy bezpieczeństwa i jest zawracana z powrotem do gniazda reaktora.

**Rys. 7. Projektowa odporność na poważne awarie.**



## Probabilistyczna ocena ryzyka

W procesie projektowania reaktora AP1000 wykorzystano dalsze postępy wiedzy w zakresie narzędzi probabilistycznej oceny ryzyka. W rezultacie, w reaktorze AP1000 występuje lepsze połączenie rezerwowania z zróżnicowaniem układów bezpieczeństwa. Projekt oparty jest na zasadzie głębokiej obrony, który wykorzystuje układy pomiarowo-kontrolne i inne układy nie związane z bezpieczeństwem jako pierwszą linię obrony. W sytuacji gdy układy pierwszej linii obrony nie są w stanie opanować awarii, uruchamiane są pasywne układy bezpieczeństwa. Jak wynika z probabilistycznej oceny ryzyka, ryzyko uszkodzenia rdzenia reaktora oraz dużych uwolnień radioaktywnych jest dla AP1000 niezwykle niskie. Poniżej podane są łączne wyniki dla wszystkich awarii związanych z wyłączeniem zasilania w energię elektryczną, wydarzeniami spowodowanymi czynnikami wewnętrznymi, pożarami i powodziami:

- ◆ Prawdopodobieństwo uszkodzenia rdzenia:  $5 \times 10^{-7}$
- ◆ Prawdopodobieństwo dużych uwolnień:  $6 \times 10^{-8}$

Dla porównania poniżej są zestawione w tabeli wyniki dla prawdopodobieństwa uszkodzenia rdzenia:

Wymagania US NRC	$1 \times 10^{-4}$
Obecnie pracujące bloki jądrowe	$5 \times 10^{-5}$
Wymagania URD	$<1 \times 10^{-5}$
AP1000	$5 \times 10^{-7}$

Przeprowadzenie probabilistycznej oceny ryzyka zostało uwieńczone następującym stwierdzeniem wyrażonym w raporcie Amerykańskiego Komitetu Doradczego ds. Bezpieczeństwa Reaktorów (*US Advisory Committee for Reactor Safeguards*) odnośnie zatwierdzenia projektu AP1000:

”Ta probabilistyczna ocena ryzyka została dobrze przeprowadzona z zastosowaniem rygorystycznych metod ... Fakt, że probabilistyczna ocena ryzyka była integralną częścią procesu projektowania przyczynił się w sposób znaczący do osiągnięcia tak niskiego szacowanego ryzyka.”

## Główne pompy cyrkulacyjne reaktora AP1000

Wśród udoskonaleń właściwych dla AP1000 należy wymienić główne pompy cyrkulacyjne. W AP1000 zastosowano cztery szczelnie zamknięte pompy napędzane elektrycznie, po dwie w każdej pętli jak pokazano na rysunku 4. Chociaż pompy tego rodzaju były stosowane od dziesiątków lat w okrętowych reaktorach jądrowych, to komercyjne reaktory wodne ciśnieniowe (PWR) dotychczas ich nie wykorzystywały, gdyż rozmiary takich pomp niezbędne dla bloków jądrowych generacji II przekraczały ich dostępne rozmiary na rynku. W międzyczasie jednak, wzrosła maksymalna wydajność napędzanych elektrycznie pomp szczelnie zamkniętych we wspólnej obudowie. Zalety pomp szczelnie zamkniętych w stosunku do konwencjonalnych głównych pomp cyrkulacyjnych reaktora są następujące:

- Wyeliminowanie uszczelnienia wału oraz układu wtrysku wody do uszczelnienia
- Wyeliminowanie tego uszczelnienia i układu wtrysku wody prowadzi do wyeliminowania potencjalnego źródła wycieku chłodziwa z obiegu pierwotnego i wyeliminowania potencjalnej możliwości wystąpienia małej awarii utraty chłodziwa (LOCA).
- Pompy szczelnie zamknięte we wspólnej obudowie wymagają bardzo niewielkiej lub nie wymagają żadnej konserwacji, co przyczynia się do zmniejszenia dawki promieniowania dla pracowników.

## Układy pomiarowo-kontrolne AP1000

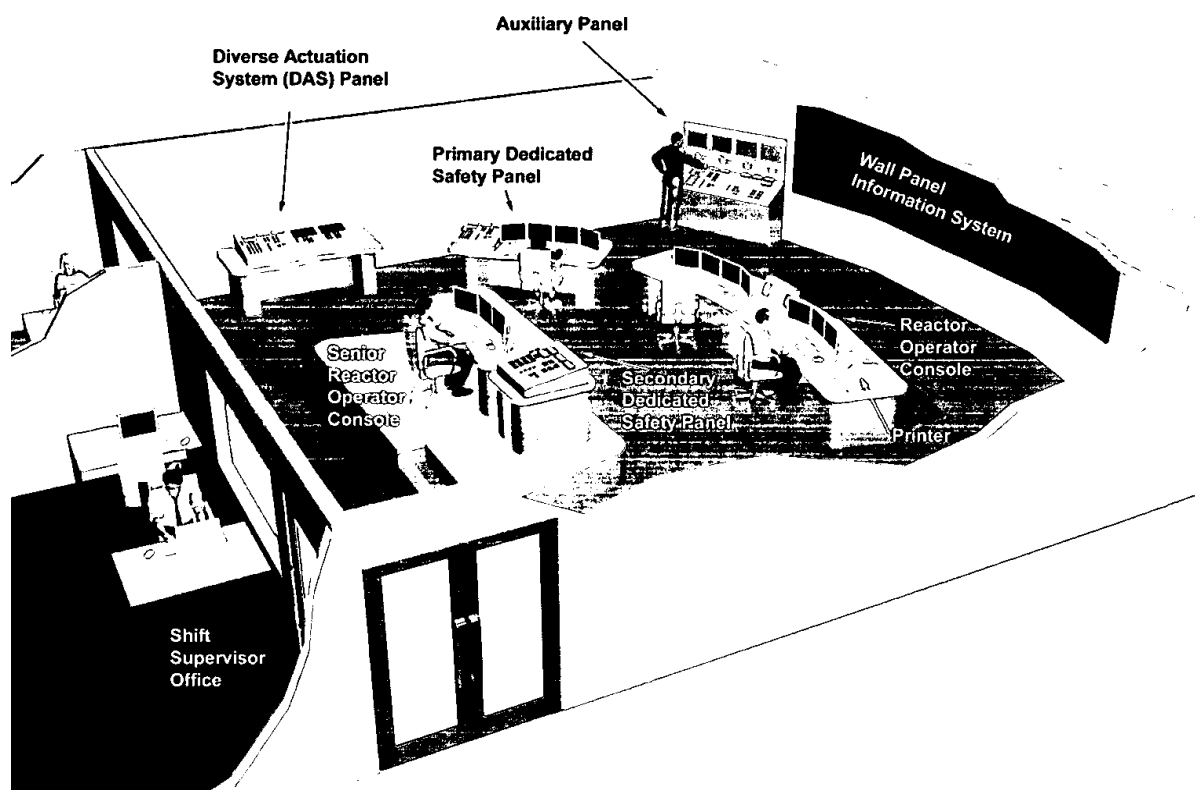
Układy pomiarowo-kontrolne opracowane przez Westinghouse dla AP1000 składają się z następujących podukładów:

- Centra operacyjne i kontroli (OCS)
- Układ obrazowania i przetwarzania danych (DDS)
- Układ monitorowania ochrony i bezpieczeństwa (PMS)
- Układ regulacji bloku (PLS)
- Układ kontroli turbiny głównej i diagnozowania (TOS)
- Układy pomiarowe wewnątrz rdzenia (IIS)
- Układ monitorowania specjalnego (SMS)
- Różne mechanizmy uruchamiające (DAS)
- Układ monitorowania promieniowania (RMS)
- Układ monitorowania sejsmicznego (SJS)

Poniżej przedstawione są najważniejsze informacje o niektórych spośród tych systemów.

Centra operacyjne i kontroli (OCS) zawierają urządzenia umożliwiające kontrolę elektrowni przez człowieka: główne pomieszczenie kontroli, pomieszczenie zaplecza technicznego, stacja robocza do zdalnego wyłączania reaktora, urządzenia do działań awaryjnych, miejscowe stanowiska kontroli, wraz z odpowiednimi stacjami roboczymi dla każdego z tych centrów. Dla przykładu, główne pomieszczenie kontroli ma kontrolowane środowisko i jest zaprojektowane według, zrealizowanego przez Westinghouse, kompleksowego programu rozwoju ergonomii. W programie tym uwzględniono szerokie doświadczenie operacyjne. Na rysunku 8. jest pokazany układ głównego pomieszczenia kontroli dla AP1000.

**Rys. 8 Główne pomieszczenie kontroli**



Układ regulacji bloku (PLS) umożliwia kontrolowanie ruchu i pomiar położenia prętów kontrolnych oraz kontrolowanie transportu ciepła z reaktora jądrowego do głównej turbiny parowej za pomocą następujących głównych funkcji kontrolnych:

- ◆ Poziom wody i ciśnienia w stabilizatorze ciśnienia

- ◆ Poziom wody w wytwornicy pary
- ◆ Zrzut pary (obejście na turbinie)
- ◆ Szybka redukcja mocy
- ◆ Różne elementy wyposażenia układów kontrolnych (pompy, silniki elektryczne, zawory, wyłączniki, itd.)

Układ umożliwia kontrolę automatyczną i manualną.

Układ monitorowania specjalnego (SMS) jest układem nie związanym z bezpieczeństwem, który zawiera podukłady sprzężone z architekturą układów pomiarowo-kontrolnych i ma za zadanie realizowanie wyspecjalizowanej diagnozy oraz długofalowej funkcji monitorowania, których celem jest wykrywanie metalowych szczątków w obiegu pierwotnym, wibracji grodzi reaktora oraz monitorowanie głównych pomp cyrkulacyjnych reaktora.

Różne mechanizmy uruchamiające (DAS) spełniają funkcje układów pomiarowo-kontrolnych niezbędne do zmniejszenia ryzyka związanego z założonym uszkodzeniem spowodowanym wspólną przyczyną w układzie monitorowania ochrony i bezpieczeństwa (PMS). Wśród rodzajów uszkodzeń spowodowanych wspólną przyczyną, do których odnoszą się mechanizmy DAS można wymienić: projektowe błędy oprogramowania, projektowe błędy sprzętowe oraz błędy testowania i konserwacji.

### **Modułarna budowa AP1000**

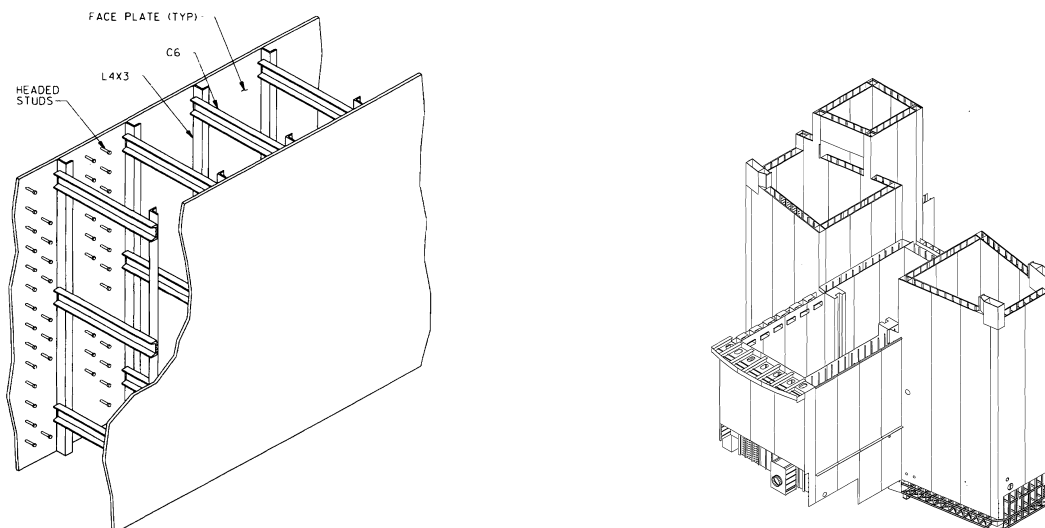
AP1000 wykorzystuje zalety technologii modularnej w projektowaniu i budowie. Daje ona wiele korzyści w porównaniu z metodami najczęściej określanymi jako konwencjonalne lub „profilowane” metody budowlane. Te korzyści polegają na skróceniu czasu budowy oraz umożliwiają one wykonanie bardziej złożonych zadań konstrukcyjnych w lepiej kontrolowanych warunkach fabrycznych. Podejście to umożliwia wcześniejsze rozpoczynanie poszczególnych prac i równolegle do innych zadań – wytwarzanie modułów w fabryce nie musi czekać na rozpoczęcie pracy związanej z daną lokalizacją. Korzyści z modularnej budowy AP1000 są tego samego rodzaju jak te, które są występują w innych dziedzinach, takich jak np. budowa statków lub budowa platform wiertniczych do wydobywania ropy naftowej.

Moduły AP1000 są kwalifikowane jako strukturalne, tj. przeznaczone do pozostawienia na miejscu szalowania, elementy wyposażenia, rury wraz z kratownicami. W sumie jest około 357 modułów. Większe moduły strukturalne składają się z mniejszych modułów, które można składać w różnym stopniu, w zależności od dostępnego środka transportu (barki, kolej, ciągniki) na trasie do danej lokalizacji. Moduły strukturalne stosuje się do wykonania podłoża i ścian wewnątrz obudowy bezpieczeństwa i tworzą one pierwszą ścianę ochronną wokół zbiornika reaktora oraz drugą ścianę ochronną wokół wytwornicy pary i stabilizatora ciśnienia, dużego zbiornika rezerwowego wody i przestrzeni do wymiany paliwa. Moduły te są zasadniczo wytwarzane z płyt stalowych połączonych kratownicami. Są one przytwierdzone do podłoża ze zbrojonego betonu, a następnie wypełniane betonem. Na rysunku 9. jest pokazany przykład typowego modułu do budowy ściany. Na rysunku 10. pokazany jest duży kompletny moduł służący do obudowania układu obiegu pierwotnego. Taki duży moduł może być złożony z mniejszych modułów transportowanych na miejsce budowy. Można go następnie przemieścić na miejsce montażu za pomocą ciężkich dźwigów umożliwiających budowę od góry. Oznacza to, że moduły i duże elementy wyposażenia mogą być umieszczane wewnątrz otwartej od góry obudowy bezpieczeństwa dzięki zastosowaniu ciężkiego dźwigu. Prowadzi to do oszczędności czasu i kosztów.

**Rys. 9. Szczegóły budowy modułu ściany.**

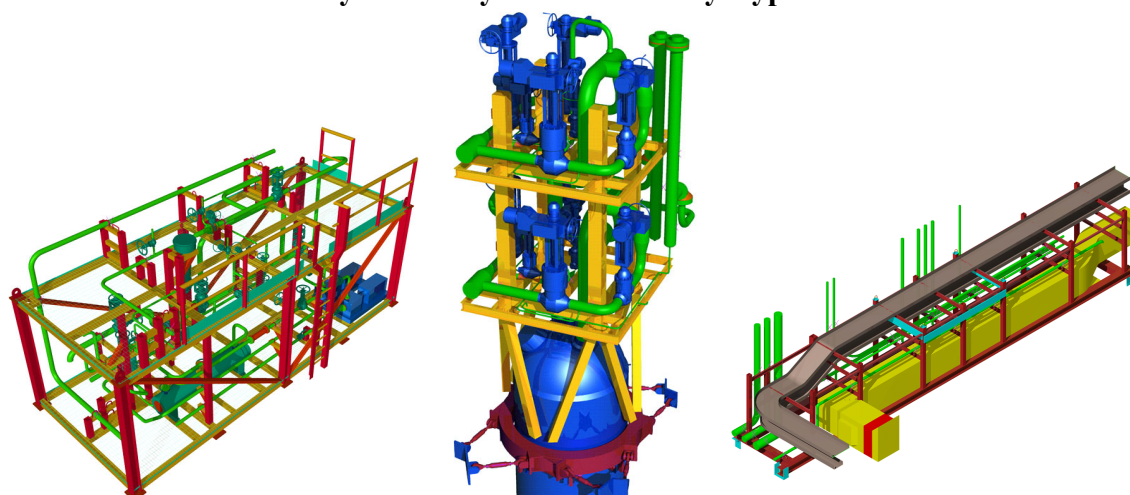
Płyta stalowa

**Rys. 10. Moduł strukturalny.**



Moduły wyposażenia mogą się składać z pomp, zaworów, rur i urządzeń pomiarowych przymocowanych do samonośnej stalowej kratownicy, którą można prefabrykować, przetestować oraz zainstalować jako całościowy element. Przykłady takich modułów są pokazane na rysunku 11.

**Rys. 11. Przykładowe moduły wyposażenia.**



### **Harmonogram budowy AP1000**

Harmonogram budowy AP1000 został przygotowany we współpracy ze światowej klasy inżynierami architektami i konstruktorami obiektów jądrowych. W harmonogramie budowy AP1000 korzysta się z oprogramowania Primavera. AP1000 jest również modelowany trójwymiarowo za pomocą oprogramowania Intergraph. Ta technika modelowania trójwymiarowego opiera się na utworzeniu bazy danych, która zawiera wszystkie elementy bloku jądrowego. Na końcu, harmonogram połączono z trójwymiarowym modelem bloku, w celu wygenerowania planu budowy w czasie. To połączenie pozwala na wirtualne obserwowanie postępów budowy dzięki generowaniu trójwymiarowego obrazu przedstawiającego stan obiektu w każdej fazie okresu budowy. Pozwala to na szczegółowy przegląd czynności związanych z budową, montażem i testowaniem, jak i badanie interakcjami pomiędzy nimi.

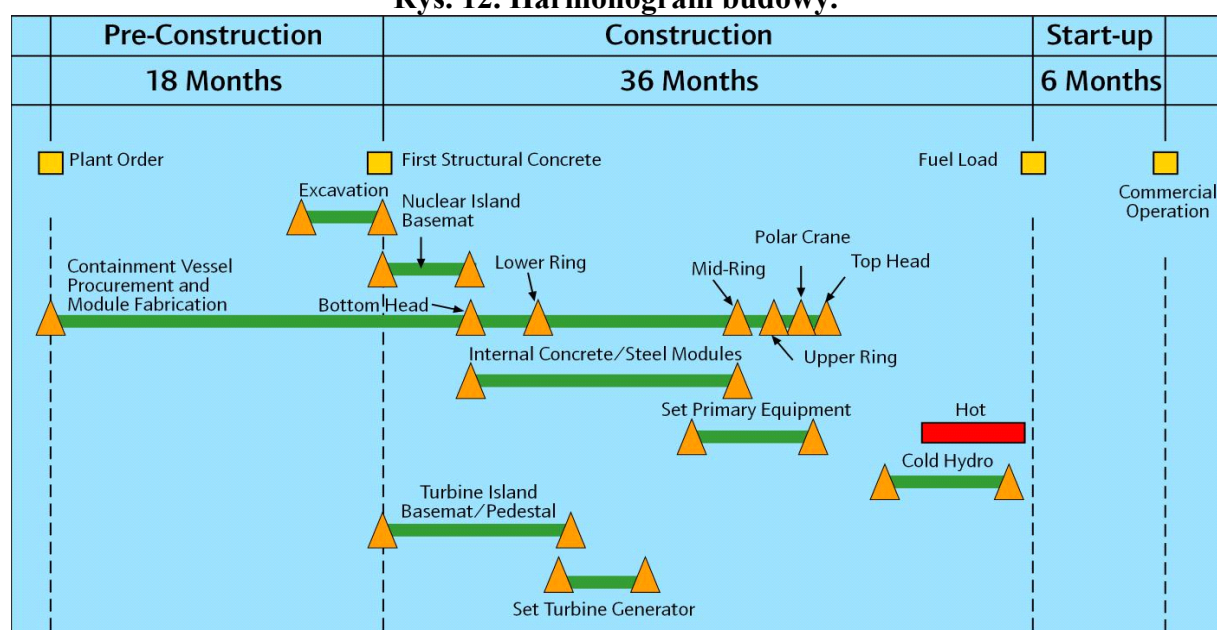
Standardowy harmonogram budowy AP1000 jest szczegółowym trój etapowym harmonogramem, który jest kompletny oraz gotowy do wykorzystania w konkretnym

przypadku. W tym harmonogramie występuje mniej niż pięć działań i etapów krytycznych (takich jak zezwolenia), które są ograniczone konkretną datą kalendarzową. Pozostałe daty wynikają z logiki powiązań zawartych w modelu. Harmonogram składa się z 6000 działań i etapów krytycznych. Standardowy harmonogram budowy AP1000 faktycznie zawiera mniej działań niż harmonogramy budowy wcześniejszych bloków jądrowych, ponieważ występuje tu mniejsza ilość wyposażenia, a blok jest mniejszy, co wymaga mniejszej ilości betonu i stali do jego zbudowania.

Standardowy harmonogram budowy AP1000 jest pokazany z dużym przybliżeniem na rysunku 12.

Czas pomiędzy uzyskaniem odpowiednich zezwoleń (*authorization to proceed – ATP*), a wylaniem pierwszego betonu jest poświęcony zamawianiu i wyprodukowaniu modułów oraz dużych elementów wyposażenia obiegu pierwotnego. Na ścieżce krytycznej jest produkcja wytwornic pary. Jednocześnie prowadzone są roboty terenowe i fundamentowe.

**Rys. 12. Harmonogram budowy.**

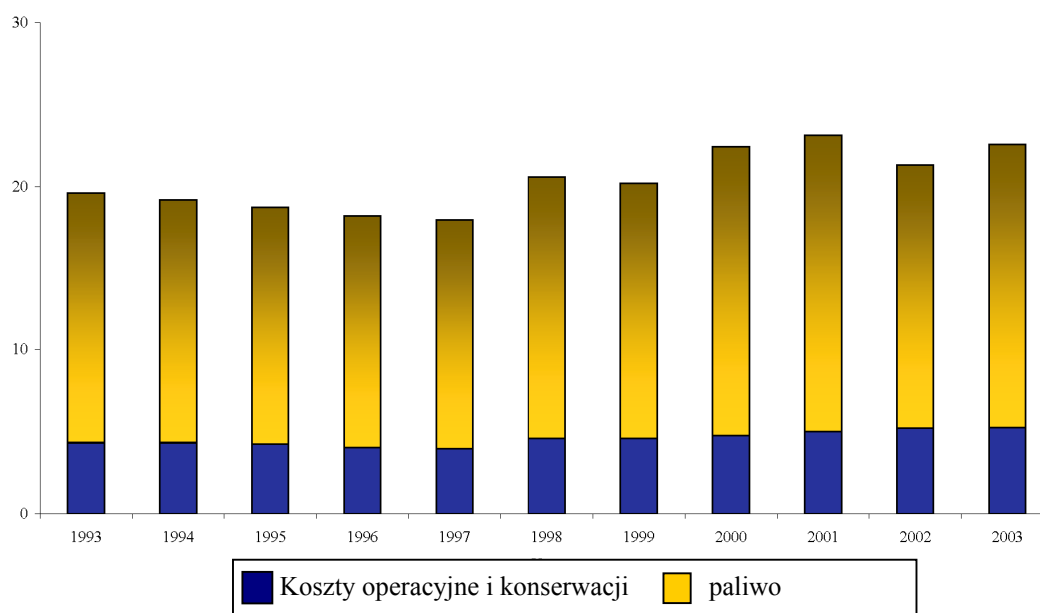


W przedstawionym powyżej typowym scenariuszu, do ścieżki krytycznej w harmonogramie należą: dostarczenie i zainstalowanie wytwornic pary wraz ze skompletowaniem układu obiegu pierwotnego, finalne testowanie konstrukcji, testowanie układów zimnych i gorących oraz testowanie rozruchowe przed załadowaniem paliwa. Techniczna poprawność modelu harmonogramu budowy i przeprowadzonej analizy ma zasadnicze znaczenie dla jakiegokolwiek projektu elektrowni jądrowej. Jest rzeczą oczywistą, że warunki specyficzne dla danej lokalizacji muszą być uwzględnione przy tworzeniu harmonogramu dla danego projektu. Jednak, w dzisiejszych czasach, do takiej pracy można wykorzystać narzędzia komputerowe, które obecnie są o wiele doskonalsze od dotychczasowych.

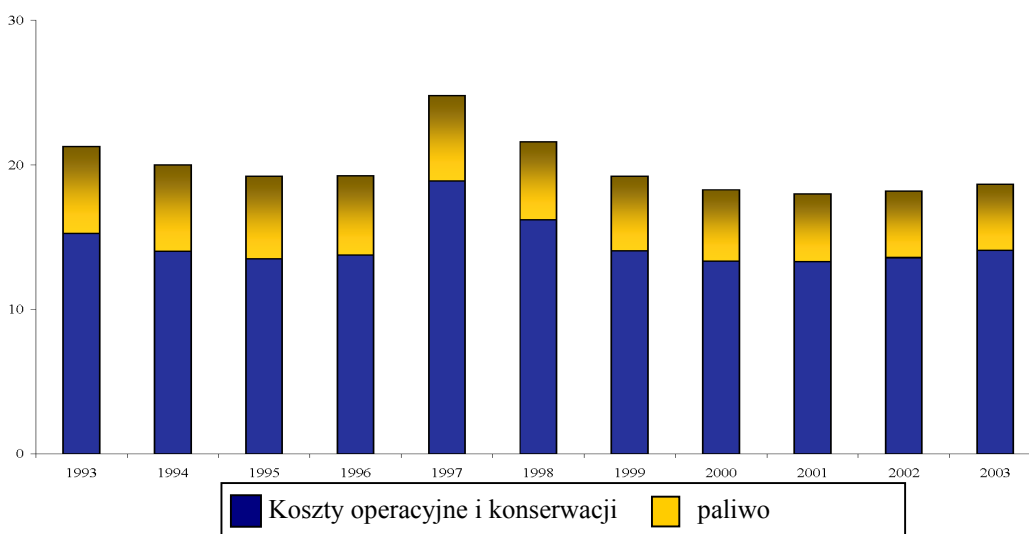
## Czynniki mające wpływ na koszty

W końcowej analizie należy wykazać, że opcja jądrowa jest konkurencyjna kosztowo w porównaniu z alternatywnymi sposobami wytwarzania energii elektrycznej. Wysoka wartość wybudowanych bloków jądrowych została udowodniona dzięki ich niskim kosztom eksploatacyjnym. Na rysunku 13a oraz 13b są pokazane dane o kosztach eksploatacyjnych (koszty ściśle operacyjne, konserwacji i paliwa) dla elektrowni węglowych i jądrowych w USA zebrane przez NRC. Koszty eksploatacyjne są porównywalne. Jednak to porównanie nie uwzględnia jakichkolwiek przyszłych wydatków, związanych z zastosowaniem węgla, które należałoby ponieść aby zmniejszyć emisje gazów cieplarnianych, ani podatków od emisji. Reaktor AP1000 będzie stanowił ulepszenie w stosunku do obecnego stanu rzeczy i umocni jeszcze wykazaną tu przewagę. Wymagania kosztowe odnośnie konserwacji i testowania dla AP1000 będą zasadniczo znacznie mniejsze w porównaniu z obecnymi blokami jądrowymi o porównywalnej mocy, ponieważ AP1000 ma zdecydowanie mniej zaworów, pomp, kabli i rur.

Rys. 13a. Koszty eksploatacyjne w elektrowniach parowych opalanych węglem w USD/MWe h.



Rys. 13b. Koszt eksploatacyjne w elektrowniach jądrowych w USD/MWe h.



Jednakże, jest rzeczą dobrze udowodnioną, że najważniejszym czynnikiem kosztowym przy produkcji energii elektrycznej w elektrowni jądrowej jest jej pierwotny nakład inwestycyjny. W projekcie AP1000, Westinghouse starał się o zmniejszenie tego składnika kosztowego. Projektowym celem AP1000 jest konkurencyjność kosztowa w porównaniu z innymi sposobami wytwarzania energii elektrycznej. Dla porównania, w tablicy 1. podano koszty budowy dla nowoczesnych bloków węglowych. Wydaje się, że założony tutaj cel jest w pełni wykonalny. Podobnie jak wyżej, nie uwzględniono przyszłych dodatkowych nakładów, które by powiększyły te koszty, a które należałoby ponieść, aby zmniejszyć emisje gazów cieplarnianych.

Tablica 1.  
Koszty budowy bloku węglowego elektrowni w USA

Typ obiektu	Wielkość (MWe)	Koszt budowy (USD/kWe)	Liczba uwzględnionych obiektów
Kocioł pyłowy, parametry podkrytyczne	500	1370	1
Kocioł pyłowy, parametry nadkrytyczne	500	1437	1
Kocioł pyłowy, parametry nadkrytyczne, nowa technologia PRB, obiekt <i>Weston4</i>	515	1461	3
Kocioł ze złożem fluidalnym	300	1505	1
Bloki gazowo-parowe ze zgazowaniem węgla (technologia IGCC)	550	1647	1
Bloki gazowo-parowe ze zgazowaniem węgla (IGCC + nowa technologia PRB)	550	1845	1
Oczyszczony węgiel świeży	600	1213	2
Bloki gazowo-parowe ze zgazowaniem paliwa	550	1402	2
Bloki gazowo-parowe z zgazowaniem paliwa + sekwestracja CO <sub>2</sub>	380	2006	2

Zróżdła: 1. *Michigan Capacity Need Forum: Staff Report to the Michigan Public Service Commission*. 3.01.2006.

2. *Energy Information Administration, US DOE*.

3. *Weston4* – ma być uruchomiony w 2008 r., *Wisconsin Public Service Corporation*.

PRB - nowa technologia - *Powder River Basin Coal*

Co do czynnika kosztowego związanego z „czasem życia” bloku, zbiornik reaktora AP1000 zaprojektowano na okres eksploatacji 60 lat. Przekłada się to na okres eksploatacji całego bloku. Dwie wytwornice pary AP1000 posiadają rury ze stopu 690. Jak wynika ze znacznego doświadczenia operacyjnego Westinghouse’a odnośnie projektowania i wymiany wytwornic pary, stop 690 okazał się optymalnym, pod względem trwałości, materiałem do tego celu.

### **Zgodność projektu AP1000 z wymaganiami towarzystw energetycznych (*European Utility Requirements – EUR*)**

W latach 2002-2005 organizacja EUR z pomocą zespołu Europejskiego Programu Rozwoju Pasywnych Bloków Jądrowych (*European Passive Plant Programme – EPP*) (w którego skład wchodzi: EDF, SwissNuclear, Westinghouse oraz Ansaldo) dokonała dogłębnego przeglądu zgodności projektu reaktora wodnego ciśnieniowego AP1000 z dokumentem EUR.

Zgodność z dokumentem EUR była kluczowym celem projektowym dla wielu projektów bloków jądrowych, badanych i rozwijanych w ramach programu EPP. W trakcie projektowania dokonano oceny wpływu zgodności z wymogami EUR na kształt projektu pasywnego bloku Westinghouse’a. W niektórych wypadkach, wymagania EUR wpłynęły na specyficzne cechy projektowe AP1000 (np. eksploatacja z niskimi stężeniami roztworu boru).



W innych dziedzinach przeprowadzono odpowiednie badania, w celu oszacowania zgodności projektu AP1000 z wymaganiami europejskimi. Dla przykładu badania te obejmowały:

- ◆ układ przetwarzania ścieków promieniotwórczych uwzględniający odzyskiwanie boru,
- ◆ projekty układów usuwania ciepła (np.: usuwanie ciepła powyłączeniowego, chłodzenie poszczególnych urządzeń, woda ruchowa), które byłyby zgodne z wymaganiami EUR dotyczącymi szybkiego schładzania,
- ◆ ocena projektu pod względem zgodności z normami dawek promieniowania dokumentu EUR, który dopuszcza oszacowania oparte na realistycznych założeniach,
- ◆ zdolność bloku reaktora do przeciwdziałania specyficznym awariom projektowym przyjmowanym w analizach awaryjnych reaktorów europejskich (np.: szybkie rozrzedzenie roztworu boru, jednoczesne rozerwanie rur wytwornic pary w wielu miejscach).

Badania te, zgodnie z oczekiwaniami, wykazały wysoki poziom zgodności projektu AP1000 z wymaganiami EUR. Jednak, w kilku obszarach dalsza praca będzie niezbędna, aby doprowadzić do pełnej zgodności tego projektu. W niektórych wypadkach, trzeba będzie zastosować inne zasady wyjściowe do już przeprowadzonej analizy, jak na przykład przyjęcie założeń realistycznych zamiast najgorszych z możliwych, jak to wykazano w przypadku obliczania oczekiwanej rocznej dawki promieniowania dla pracowników. W innych przypadkach, jak na przykład w sprawie odporności na upadek samolotu, nie ma odpowiednich wymagań w USA (amerykańskie instytucje NRC oraz EPRI stwierdziły jednak, że projekty obudowy bezpieczeństwa amerykańskich bloków jądrowych są faktycznie odporne na upadek samolotu).

W fazie 2E programu EPP, która ma się rozpocząć w połowie 2006 r., projekt AP1000 ma być doprowadzony do optymalnej zgodności z wymaganiami EUR. W wyniku tego, oczekuje się, że albo projekt bloku AP1000 okaże się zgodny z EUR, albo zostaną określone, niezbędne do uzyskania zgodności, zmiany w projekcie.

## **Podsumowanie**

AP1000 jest projektem reaktora wodnego ciśnieniowego (PWR), który jest wyraźną i praktyczną opcją dla towarzystw energetycznych. Został on zaprojektowany tak, aby był konkurencyjny w stosunku do elektrowni opalanych paliwami kopalnymi, a stanie się tak szczególnie wtedy, gdy podjęte zostaną działania prowadzące do zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych. W wyniku wykorzystania nagromadzonego przez dziesięciolecia doświadczenia eksploatacyjnego, AP1000 wykorzystuje sprawdzone technologie w ich nowej kombinacji. Utwierdza to przewagę cech właściwych dla bloków jądrowych, jednocześnie zmniejszając ich koszt i złożoność. Należy podkreślić, że do ważnych zalet projektu AP1000 należy fakt, że jest on, jak można łatwo wykazać, o wiele bezpieczniejszym blokiem jądrowym oraz zaawansowanym projektem, który już przeszedł przez procedurę zatwierdzania w amerykańskiej komisji dozoru jądrowego NRC.