

mgr inż. Karol Skiba^{1*)}

ORCID: 0009-0001-6303-3825

prof. dr hab. inż. Roman Kinasz²⁾

ORCID: 0000-0001-6715-9583

Structural elements as components of passive safety systems in the AP1000 nuclear power plant

Konstrukcje budowlane jako elementy pasywnych systemów bezpieczeństwa elektrowni jądrowej AP1000

DOI: 10.15199/33.2026.09.01

Abstract: In the paper an analysis of civil structures as elements of the passive safety systems of the AP1000 nuclear power plant is presented. The steel containment vessel, the shield building with the PCCWST tank, the air baffle and the CA01 and CA03 structural modules are characterized. It is shown that these structures are not limited solely to a load-bearing role, but co-create the passive safety systems. A comparison with Generation III and III+ reactors and experience from the construction of the reference units indicate that prefabrication is the critical stage of project delivery, and that the benefits of modularization depend on the maturity of the supply chain. In the context of the planned construction of three AP1000 units at Lubiatowo-Kopalino, this means that the key challenge for Polish industry is to build the appropriate technical competences and to meet the requirements of nuclear quality assurance systems.

Keywords: AP1000; passive safety systems; nuclear supply chain; nuclear constructions; modularization.

The AP1000 (Advanced Passive) nuclear power plant, designed by the American company Westinghouse Electric Company, belongs to the Generation III+ class of pressurized water reactors (PWRs). Its safety concept is based on passive systems that rely solely on natural phenomena: gravity; natural convection; compressed gases, and density differences – without the need for pumps, diesel generators, or external power sources [1]. The AP1000 design received Final Design Approval from the U.S. Nuclear Regulatory Commission (U.S. NRC), and in March 2017, it successfully completed the Generic Design Assessment (GDA) process in the United Kingdom, receiving Design Acceptance Confirmation (DAC) from the Office for Nuclear Regulation (ONR) and a Statement of Design Acceptability (SoDA) from the Environment Agency. Reactors of this type are already in operation in China (Sanmen, Haiyang) and in the U.S. (Vogtle).

In the case of the AP1000, it is not active mechanical systems but civil structures that play a key role in ensuring safety. This is a fundamental feature that distinguishes this nuclear power plant from conventional nuclear power plants. The steel con-

Streszczenie: W artykule przedstawiono analizę konstrukcji budowlanych jako elementów pasywnych systemów bezpieczeństwa elektrowni jądrowej AP1000. Scharakteryzowano stalową obudowę bezpieczeństwa, budynek osłonowy ze zbiornikiem PCCWST, przegrodę powietrzną oraz moduły strukturalne CA01 i CA03. Wykazano, że konstrukcje te nie ograniczają się jedynie do roli nośnej, lecz współtworzą pasywne systemy bezpieczeństwa. Porównanie z reaktorami generacji III i III+ oraz doświadczenia z budowy bloków referencyjnych wskazują, że prefabrykacja jest etapem krytycznym realizacji inwestycji, a korzyści modularyzacji zależą od dojrzałości łańcucha dostaw. W kontekście planowanej budowy trzech bloków AP1000 w Lubiatowie-Kopalinie oznacza to, że kluczowym wyzwaniem dla polskiego przemysłu jest zbudowanie odpowiednich kompetencji technicznych i spełnienie wymagań jądrowych systemów zapewnienia jakości. **Słowa kluczowe:** AP1000; pasywne systemy bezpieczeństwa; jądrowy łańcuch dostaw; budownictwo jądrowe; modularyzacja.

Elektrownia jądrowa AP1000 (Advanced Passive), zaprojektowana przez amerykańską firmę Westinghouse Electric Company, należy do generacji III+ reaktorów wodnych ciśnieniowych (PWR). Jej koncepcja bezpieczeństwa bazuje na pasywnych systemach, które do swojego działania wykorzystują wyłącznie zjawiska naturalne: grawitację; konwekcję naturalną; sprężone gazy i różnicę gęstości, bez konieczności stosowania pomp, generatorów Diesla ani zewnętrznych źródeł zasilania [1]. Projekt AP1000 uzyskał ostateczne zatwierdzenie projektu (Final Design Approval) od amerykańskiego dozoru jądrowego (U.S. NRC), a w marcu 2017 r. pomyślnie przeszedł proces Generic Design Assessment (GDA) w Wielkiej Brytanii, otrzymując Design Acceptance Confirmation (DAC) od Office for Nuclear Regulation (ONR) oraz Statement of Design Acceptability (SoDA) od Environment Agency. Reaktory tego typu pracują już w Chinach (Sanmen, Haiyang) oraz w USA (Vogtle).

W przypadku AP1000 kluczową rolę w realizacji funkcji bezpieczeństwa pełnią nie aktywne systemy mechaniczne, lecz konstrukcje budowlane. To jest fundamentalna cecha odróżniająca tę elektrownię jądrową od konwencjonalnych elektrowni jądrowych. Stalowy zbiornik obudowy bezpieczeństwa (Containment Vessel) ma jednocześnie funkcję bariery ciśnieniowej i powierzchni wymiany ciepła. Betonowy budynek osłonowy (Shield Building) zawiera natomiast zbiornik wody chłodzącej,

¹⁾ Szkoła Doktorska, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

²⁾ Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami

*) Address for correspondence: kskiba@agh.edu.pl

tainment vessel serves both as a pressure barrier and a heat transfer surface. The concrete shield building, in turn, incorporates the cooling water storage tank, the air flow paths and the exhaust chimney. The internal structures of the containment vessel serve as a support structure for the reactor and form the In-containment Refueling Water Storage Tank (IRWST) a key element of the core's passive cooling system [2, 3].

This article discusses how the AP1000's civil structures contribute to passive safety functions and what benefits and limitations result from the adopted design concept. The analysis includes the identification of the most important structures that interact with the passive containment and core cooling systems, a description of their safety functions, and a comparison of AP1000 solutions with selected Generation III and III+ technologies. It also takes into account experience gained from the construction of reference units and design changes included in Revision 20 of the Design Control Document. This issue is particularly relevant in the Polish context, where the construction of three AP1000 reactor units is planned at the Lubiato-Kopalino site in the municipality of Choczewo in Pomerania by Polskie Elektrownie Jądrowe (PEJ) in cooperation with the Westinghouse-Bechtel consortium [4, 5].

AP1000 Passive Safety Systems

The passive safety systems in the AP1000 power plant are advanced systems designed to protect the reactor core and maintain the integrity of the containment structure by relying solely on natural physical phenomena – such as gravity, natural convection, and heat transfer through condensation – in the event of an accident. Their key role is to eliminate the need for active safety systems that rely on equipment such as diesel-powered pumps, fans, or external alternating current (AC) power sources. These systems are designed so that, once automatically initiated, they ensure safe cooling for at least 72 hours without any operator intervention [1]. Compared to conventional PWR, the AP1000's passive systems contain fewer components – approximately one-third the number of remotely controlled valves – and do not include any safety pumps. The Passive Core Cooling System (PXS) provides emergency cooling by injecting borated water into the reactor. The system utilizes various water sources: core makeup tanks (CMTs); accumulators (ACCs), and the in-containment refueling water storage tank (IRWST); in addition, during a loss-of-coolant accident (LOCA), the bottom of the containment vessel is flooded. The system also includes a passive residual heat removal heat exchanger (PRHR HX) immersed in the IRWST pool [1]. All system components are connected to the reactor via direct vessel injection (DVI) lines, as shown in Figure 1.

The Passive Containment Cooling System (PCS) is responsible for reducing the pressure and temperature inside the containment, acting as the ultimate heat sink. This system uses the steel Containment Vessel (CV) as a heat transfer surface, cooled by water flowing down by gravity from the Passive Containment Cooling Water Storage Tank (PCCWST), located on the roof of the shield building, and by natural air circulation in the annular gap between the containment and the shield building [2, 3, 6]. Both passive safety systems are closely associated with specific civil structures.

kanały powietrzne oraz komin wyciągowy. Wewnętrzne struktury obudowy stanowią konstrukcję wsporczą dla reaktora i tworzą wewnętrzny zbiornik zapasu wody do przeładunku paliwa IRWST (In-containment Refueling Water Storage Tank) – kluczowy element pasywnego chłodzenia rdzenia [2, 3].

W artykule omówiono, w jaki sposób konstrukcje budowlane AP1000 uczestniczą w realizacji funkcji pasywnego bezpieczeństwa oraz jakie korzyści i ograniczenia wynikają z przyjętej koncepcji konstrukcyjnej. Analiza obejmuje identyfikację najważniejszych konstrukcji współpracujących z pasywnymi systemami chłodzenia obudowy i rdzenia, opis ich funkcji bezpieczeństwa oraz porównanie rozwiązań AP1000 z wybranymi technologiami generacji III i III+. Uwzględniono również doświadczenia z realizacji bloków referencyjnych oraz zmiany projektu zawarte w rewizji 20 dokumentacji Design Control Document. Zagadnienie to jest szczególnie istotne w kontekście polskim, gdzie planowana jest budowa trzech bloków zgodnie z projektem AP1000 w lokalizacji Lubiato-Kopalino w gminie Choczewo na Pomorzu, przez spółkę Polskie Elektrownie Jądrowe (PEJ) we współpracy z konsorcjum Westinghouse-Bechtel [4, 5].

Pasywne systemy bezpieczeństwa AP1000

Pasywne systemy bezpieczeństwa w elektrowni AP1000 to zaawansowane układy zaprojektowane w celu ochrony rdzenia reaktora oraz utrzymania integralności obudowy bezpieczeństwa przez wykorzystanie wyłącznie naturalnych zjawisk fizycznych, takich jak grawitacja, konwekcja naturalna, wymiana ciepła przez kondensację na wypadek stanu awaryjnego. Ich kluczową rolą jest eliminacja konieczności stosowania aktywnych systemów bezpieczeństwa, wykorzystujących takie urządzenia, jak pompy napędzane generatorami Diesla, wentylatory czy zewnętrzne źródła zasilania prądem przemiennym (AC). Systemy te są zaprojektowane tak, aby po automatycznej inicjacji zapewniały bezpieczne chłodzenie przez co najmniej 72 h bez jakiegokolwiek interwencji operatora [1]. W porównaniu z konwencjonalnymi reaktorami PWR, pasywne systemy AP1000 zawierają mniej komponentów – ok. jednej trzeciej liczby zaworów zdalnie sterowanych i nie zawierają żadnych pomp bezpieczeństwa [1].

Pasywny system chłodzenia rdzenia (Passive Core Cooling System – PXS) zapewnia chłodzenie awaryjne przez wtrysk wody borowanej do reaktora. System wykorzystuje różne źródła wody: zbiorniki wody uzupełniającej (Core Makeup Tanks – CMT); akumulatory ciśnieniowe (Accumulators – ACCs) oraz wewnętrzny zbiornik zapasu wody do przeładunku paliwa (In-containment Refueling Water Storage Tank – IRWST), a także w stanie awarii utraty chłodziwa (LOCA) zalany jest dół obudowy bezpieczeństwa. System obejmuje również pasywny wymiennik ciepła rezydualnego (PRHR HX), zanurzony w basenie IRWST [1]. Wszystkie elementy systemu są połączone z reaktorem przez linie wtrysku bezpośredniego (DVI), co przedstawiono na rysunku 1.

Pasywny system chłodzenia obudowy bezpieczeństwa (Passive Containment Cooling System – PCS) odpowiada za obniżanie ciśnienia i temperatury wewnątrz obudowy bezpieczeństwa, stanowiąc ostateczny odbiornik ciepła. System ten wykorzystuje stalowy zbiornik obudowy bezpieczeństwa (Containment Vessel – CV), jako powierzchnię wymiany ciepła, chłodzony

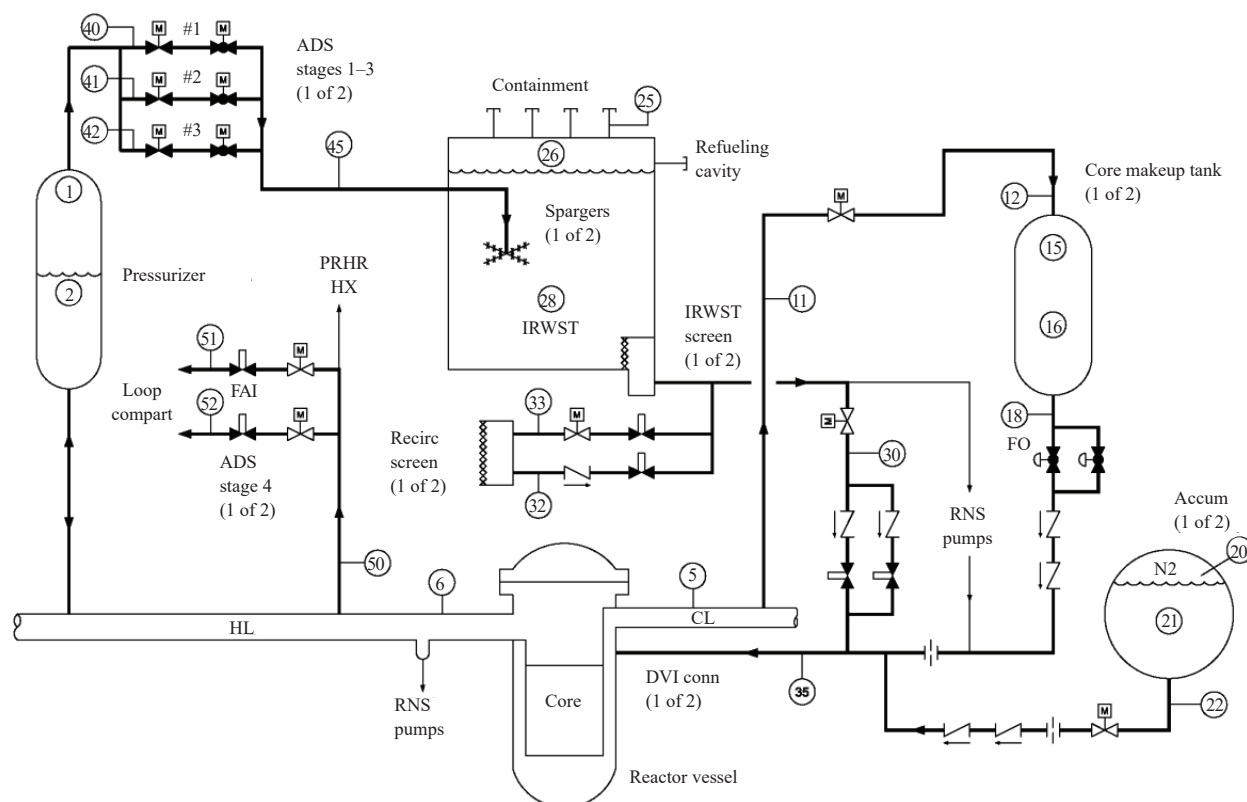


Fig. 1. Simplified diagram of the PXS passive safety system [1]

Rys. 1. Uproszczony schemat pasywnego systemu bezpieczeństwa PXS [1]

Containment Vessel

Compared with EPR or ABWR reactors, where the inner containment is a reinforced concrete structure with a steel liner, in the AP1000 the inner enclosure of the reactor is formed by a steel containment, which is a free-standing cylindrical steel pressure vessel with ellipsoidal heads [1], shown in Figure 2. It has a diameter of approximately 39.62 m and a total height of 65.63 m. The structure weighs a total of approximately 4,000 metric tons. The vessel was designed and fabricated in accordance with ASME Code Section III, Division 1, Subsection NE [7]. It is made of SA-738 Grade B steel, which is characterized by high low-temperature toughness [1]. The cylindrical walls of the CV are 44.45 mm thick, with the lowest ring thickened to 47.625 mm at the point where it is anchored in concrete to protect against corrosion. The head plates are 41.275 mm thick [1]. The design pressure is 59 psig (approx. 0.407 MPa), and the design temperature is approx. 149°C. The CV walls serve as a radiation shield and a heat transfer surface in the PCS system.

The containment vessel is constructed using a modular method with large subassemblies. It consists of two heads and three ring sections (Photo 1), each of which comprises three to four horizontal shell courses with a total height of 11.6–15.5 m. The subassemblies are joined together on the construction site near the final erection location. The lower part of the vessel, below elevation 30.48 m (EL 100'-0" – Figure 2), is embedded in concrete, which protects the steel against corrosion. Above this level the vessel is covered with a zinc primer. The

wodą grawitacyjnie spływającą ze zbiornika wody pasywnego układu chłodzenia obudowy bezpieczeństwa (Passive Containment Cooling Water Storage Tank – PCCWST), znajdującego się na dachu budynku osłonowego oraz naturalną cyrkulację powietrza w pierścieniowej szczelinie między obudową a budynkiem osłonowym [2, 3, 6]. Oba pasywne systemy bezpieczeństwa są ściśle powiązane z konkretnymi konstrukcjami budowlanymi.

Obudowa bezpieczeństwa

Odmienne niż w przypadku reaktorów EPR czy ABWR, gdzie wewnętrzna obudowa bezpieczeństwa jest konstrukcją żelbetową z płaszczem stalowym, w AP1000 wewnętrzną osłonę reaktora tworzy stalowa obudowa bezpieczeństwa, będąca wolnostojącym, cylindrycznym zbiornikiem ciśnieniowym ze stali z eliptrycznymi dennicami [1], przedstawiona na rysunku 2. Ma ona średnicę ok. 39,62 m i całkowitą wysokość wynoszącą 65,63 m. Konstrukcja waży łącznie ok. 4000 ton. Zbiornik zaprojektowano i wykonano zgodnie z kodem Amerykańskiego Stowarzyszenia Mechaników ASME Section III, Division 1, Subsection NE [7]. Wykonany jest ze stali SA-738 klasy B, charakteryzującej się dużą udułnością w niskiej temperaturze [1].

Ściany cylindryczne CV mają grubość 44,45 mm, przy czym najniższy pierścień jest pogrubiony do 47,625 mm w miejscu zakotwienia w betonie w celu ochrony przed korozją. Dennice mają grubość 41,275 mm [1]. Ciśnienie projektowe wynosi wewnątrz CV 59 psig (ok. 0,407 MPa), a temperatura projektowa

key function of the CV, extending beyond the traditional understanding of a pressure vessel, is its role as an integral element of the heat transfer surface in the PCS system. Heat from inside the containment is conducted through the steel walls and is then removed at the outer surface by a water film (from the gravity-driven water discharge) and by the air stream circulating in the annulus between the vessel and the shield building.

Experience from the construction of Vogtle Units 3 and 4 indicates that quality issues during the prefabrication of containment rings and structural modules required significant corrective work, which offset some of the schedule advantages expected with modular technology. Welded construction requires rigorous control of welding distortions, tolerances, and heat treatment of circumferential welds. Additionally, the durability of the paint coating is problematic. The effectiveness of passive cooling depends on the wettability of the steel's outer surface and the continuity of the water film – and thus on the condition of the inorganic zinc coating throughout the entire 60-year operating life. Coating degradation, contamination, or localized delamination reduce the wetted surface area and decrease heat transfer efficiency. In reactors with active systems, this has no impact on safety functions, whereas in the AP1000, it is critical for maintaining passive safety functions.

Shield building, PCCWST tank and air baffle

The shield building (SB) surrounds the steel containment vessel (CV) and is a composite structure that shares a common foundation slab with the CV and the auxiliary building. The lower part of the SB is a reinforced concrete (RC) structure, while the upper part, which is not shielded by the auxiliary building, is a steel-concrete (SC) panel structure with a wall thickness of 91.4 cm. The cylindrical wall of the SB has an outer radius of 22.1 m. The SC panels consist of two steel facing plates approximately 19 mm thick, used as surface reinforcement, connected by tie rods and shear anchors, with a high-density concrete core

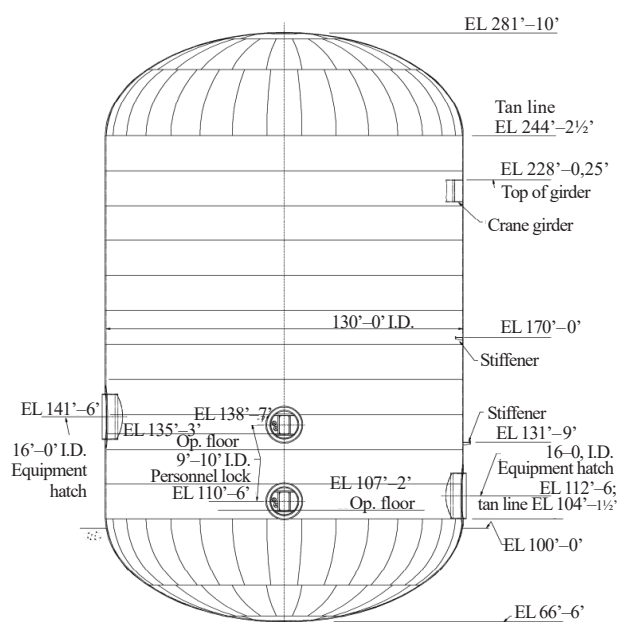


Fig. 2. AP1000 steel containment vessel – cross-section [1]

Rys. 2. Stalowy zbiornik obudowy bezpieczeństwa w AP1000 – przekrój poprzeczny [1]



Photo 1. Containment vessel rings during erection

Fot.1. Pierścienie obudowy bezpieczeństwa w trakcie montażu

ok. 149°C. Ściany obudowy służą jako bariera radiologiczna oraz powierzchnia wymiany ciepła w systemie PCS. Jest to podwójna rola wykraczająca daleko poza tradycyjne rozumienie obudowy ciśnieniowej w elektrowniach jądrowych.

Zbiornik obudowy konstruowany jest metodą modularną z wykorzystaniem dużych podzespołów. Składa się z dwóch dennic i trzech sekcji pierścieniowych (fotografia 1), z których każda obejmuje od trzech do czterech cęg poziomych o łącznej wysokości 11,6–15,5 m. Podzespoły są scalane na placu budowy w pobliżu miejsca docelowego montażu. Dolna część zbiornika poniżej poziomu 30,48 m (EL – 100'-0" – rysunek 2), jest osadzona w betonie, co chroni stal przed korozją. Powyżej tego poziomu zbiornik jest pokryty podkładem cynkowym. Kluczową funkcją stalowego zbiornika, wykraczającą poza tradycyjne rozumienie obudowy ciśnieniowej, jest jego rola jako integralnego elementu powierzchni wymiany ciepła w systemie PCS. Ciepło z wnętrza obudowy jest przewodzone przez stalowe ścianki, a następnie odbierane na zewnętrznej powierzchni przez film wodny (z grawitacyjnego zrzutu wody) oraz przez strumień powietrza krążącego w pierścieniu między

zbiornikiem a budynkiem osłonowym. Doświadczenia z budowy bloków Vogtle 3 i 4 wskazują, że problemy jakościowe przy prefabrykacji pierścieni obudowy i modułów strukturalnych wymagały istotnych prac naprawczych, co zniwelowało część przewagi harmonogramowej zakładanej w przypadku technologii modułowej.

Konstrukcja spawana wymaga rygorystycznej kontroli odkształceń spawalniczych, tolerancji oraz obróbki cieplnej spoin obwodowych. Dodatkowo problematyczna jest trwałość powłoki malarskiej. Skuteczność pasywnego chłodzenia zależy od zwilżalności zewnętrznej powierzchni stali i ciągłości filmu wodnego, a więc od stanu powłoki z nieorganicznego cynku w całym, sześćdziesięcioletnim okresie eksploatacji. Degradacja powłoki, jej zabrudzenie lub miejscowe odspojenie zmniejszają powierzchnię zwilżoną i obniżają efektywność odbioru ciepła. W reaktorach z aktywnymi systemami nie ma to wpływu na funkcję bezpieczeństwa, a w przypadku AP1000 jest kluczowe do zachowania funkcji pasywnych.

having a strength of 6,000 psi (approximately 41.37 MPa) [1, 8]. The shield building features a unique conical roof integrated with the PCCWST water tank. This structure incorporates air inlets and an exhaust chimney, creating a path for natural convection that cools the containment (Photo 2).

The shield building performs several safety functions at the same time: it constitutes a radiation shield, a barrier against external hazards (tornado, aircraft impact, missiles and others), and forms an integral part of the passive containment cooling system [1, 2]. From the perspective of the passive safety systems, the key structural element is the PCCWST tank, integrated with the roof structure of the shield building (Figure 3).

The PCCWST cooling water tank, with a capacity of over 2,864 m³, is built into the conical roof of the shield building, directly above the steel containment vessel. This is a key structural element from the perspective of passive safety systems, serving as the sole source of cooling water for the PCS system during the first 72 hours following an accident, operating solely by gravity, without pumps or electrical power. The tank's interior walls are lined with stainless steel sheet metal, and the surrounding reinforced concrete structure is designed in accordance with ACI 349 [9] and ANSI/AISC N690 [10]. The tank provides for the gravity-driven discharge of demineralized water onto the outer surface of the CV, creating a water film that enhances heat removal through evaporation. It also serves as a seismic fire-water reservoir and a source for replenishing the spent fuel pool.

The air inlets and the Tension Ring form an integral part of the shield building structure at



Photo 2. Shield building panels during transport on the construction site

Fot. 2. Panele budynku osłonowego w trakcie transportu na placu budowy

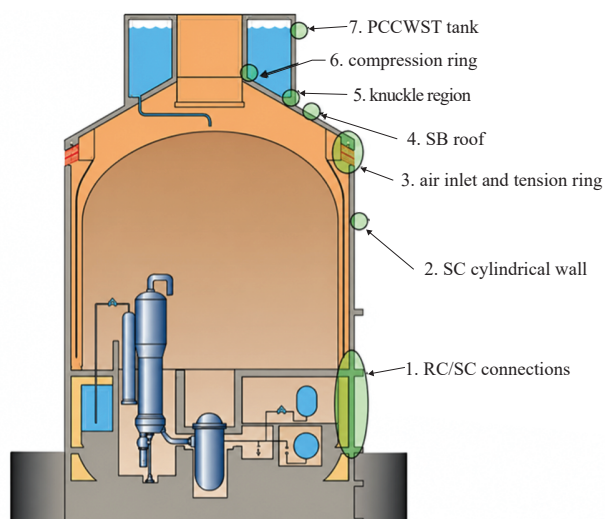


Fig. 3. Diagram of the operation of the PCS system with the structural elements of the shield building indicated [1]

Rys. 3. Schemat działania systemu PCS z zaznaczeniem elementów konstrukcyjnych budynku osłonowego [1]

Budynek osłonowy, zbiornik PCCWST i przegroda powietrzna

Budynek osłonowy (Shield Building – SB) otacza stalową obudowę bezpieczeństwa (CV) i jest konstrukcją zespoloną, dzielącą wspólną płytę fundamentową z CV oraz budynkiem pomocniczym. Dolna część budynku osłonowego jest konstrukcją żelbetonową (RC), natomiast górna, nieosłonięta przez budynek pomocniczy, to panelowa konstrukcja zespolona stalowo-betonowa (SC) o grubości ściany 91,4 cm. Cylindryczna ściana budynku osłonowego ma promień zewnętrzny 22,1 m. Panele SC składają się z dwóch stalowych płyt okładzinowych o grubości ok. 19 mm, wykorzystywanych jako zbrojenie powierzchniowe, połączonych prętami ściągającymi i kotwami ścinającymi, z wypełnieniem betonowym o dużej gęstości i wytrzymałości 6000 psi (ok. 41,37 MPa) [1, 8]. Budynek osłonowy ma unikatowy dach w kształcie stożka, zintegrowany ze zbiornikiem wody PCCWST. Konstrukcja ta zawiera wloty powietrza oraz komin wydechowy, tworząc ścieżkę naturalnej konwekcji chłodzącej obudowę bezpieczeństwa (fotografia 2).

Budynek osłonowy pełni jednocześnie kilka funkcji bezpieczeństwa: stanowi osłonę radiacyjną, barierę przed oddziaływaniami zewnętrznymi (tornado, uderzenie samolotu, pociski i inne) oraz tworzy integralną część pasywnego systemu chłodzenia obudowy bezpieczeństwa [1, 2]. Z perspektywy pasywnych systemów bezpieczeństwa kluczowym elementem konstrukcyjnym jest zbiornik PCCWST, zintegrowany ze strukturą dachu budynku osłonowego (rysunek 3).

Zbiornik wody chłodzącej PCCWST o pojemności ponad 2864 m³ jest wbudowany w stożkowy dach budynku osłonowego, bezpośrednio nad stalową obudowę bezpieczeństwa. Jest to kluczowy element konstrukcyjny z perspektywy pasywnych systemów bezpieczeństwa, który stanowi jedyne źródło wody chłodzącej dla systemu PCS w pierwszych 72 h po zdarzeniu awaryjnym, działając wyłącznie pod wpływem grawitacji, bez pomp i zasilania elektrycznego. Ścianki wewnętrzne zbiornika są wyłożone blachą ze stali nierdzewnej, a otaczająca konstrukcja żelbetonowa jest projektowana wg normy ACI 349 [9] oraz ANSI/AISC N690 [10]. Zbiornik zapewnia grawitacyjny zrzut wody demineralizowanej na zewnętrzną powierzchnię CV, tworząc film wodny intensyfikujący odprowadzanie ciepła przez parowanie. Pełni on ponadto funkcję sejsmicznego rezerwuaru wody gaśniczej oraz źródła uzupełniania basenu paliwa zużytego.

Wloty powietrza i pierścienie napinający (Tension Ring) stanowią integralną część konstrukcji budynku osłonowego na styku ścianki cylindrycznej z dachem. Wloty powietrza, wbudowane w konstrukcję SC o grubości 1,37 m (4,5 ft), umożliwiają naturalny napływ powietrza atmosferycznego do pier-

the junction of the cylindrical wall with the roof. The air inlets, built into the SC structure with a thickness of 1.37 m (4.5 ft), enable the natural inflow of atmospheric air into the annulus between the containment and the shield building. The tension ring, designed as a steel box girder with concrete infill, carries the loads from the roof and provides stiffness to the building [1].

The exhaust chimney at the top of the shield building provides a natural draught of air along the outer surface of the containment vessel. The entire arrangement, that is the inlets, the outer annulus, the inner annulus and the chimney, forms a passive cooling circuit operating on the stack effect principle. Air heated from the steel containment wall has lower density than the air in the outer annulus, which generates natural circulation [2, 3].

The air baffle is located in the annular space between the CV and the SB. Its purpose is to direct the cooling air stream downwards along the walls of the SB (in the outer annulus) and then upwards along the hot walls of the CV (in the inner annulus), thereby separating the descending stream from the ascending stream [1].

The operation of the air baffle is directly related to the mechanism of passive containment cooling. Under normal operating conditions the air flow path is permanently open, which ensures continuous ventilation of the annular space. Following an accident event and a rise in containment temperature, heat transferred through the steel walls of the containment vessel is passed to the air stream in the inner annulus. The heated air has lower density than the air in the outer annulus, which intensifies the natural circulation. At the same time, water from the PC-CWST tank flows down the outer surface of the containment vessel, evaporating and further intensifying the heat removal process. The baffle system is designed so as to minimize aerodynamic resistance. Curved profiles at the bottom of the air baffle facilitate the 180° change in flow direction [1, 2, 3]. The transfer of the heat removal function onto a building structure also has its limitations. The performance of the PCS system depends on atmospheric conditions: the temperature, as well as the humidity and pressure of the air drawn from the surroundings. In the case of the coastal Lubiato-Kopalino site this means that the analyses must take into account both high humidity, which limits evaporation of the water film, and an aggressive, saline corrosive environment. Passive systems, unlike active ones, are susceptible to so-called functional failures, consisting in the failure to establish, or the decay of, natural circulation despite full serviceability of the structural elements [11, 12]. The time horizon of operation is also limited – the PCCWST tank provides cooling for 72 h; the ancillary PCCAWST tank extends this period to the seventh day (but it is not part of passive systems, it requires the use of pumps), after which makeup water from external sources becomes necessary.

Containment internal structures and structural modules

The containment internal structures comprise all concrete and steel structures located inside the containment vessel. They provide support within the reactor cooling system, provide radiation shielding, and form the key tanks of the PXS system. The main elements include: the primary shield of the reactor;

ścienia między obudową a budynkiem osłonowym. Pierścień napinający (ściągający), zaprojektowany jako stalowy dźwigar skrzyniowy z wypełnieniem betonowym, przejmuje obciążenia z dachu i zapewnia sztywność budynku [1].

Komin wyciągowy na szczycie budynku osłonowego zapewnia naturalny ciąg powietrza wzdłuż zewnętrznej powierzchni zbiornika obudowy. Cały układ czyli wloty, pierścień zewnętrzny, pierścień wewnętrzny i komin tworzy pasywny obieg chłodzący działający na zasadzie efektu kominowego. Powietrze ogrzewane od stalowej ścianki obudowy ma mniejszą gęstość od powietrza w pierścieniu zewnętrznym, co wywołuje naturalną cyrkulację [2, 3].

Przegroda powietrzna zlokalizowana jest w pierścieniowej przestrzeni między CV a SB. Jej zadaniem jest kierowanie strumienia powietrza chłodzącego w dół wzdłuż ścian SB (w pierścieniu zewnętrznym), a następnie w górę wzdłuż gorących ścian CV (w pierścieniu wewnętrznym), rozdzielając tym samym strumień opadający od strumienia wznoszącego się [1].

Działanie przegrody powietrznej jest bezpośrednio związane z mechanizmem pasywnego chłodzenia obudowy bezpieczeństwa. W warunkach normalnej eksploatacji ścieżka przepływu powietrza jest stale otwarta, co zapewnia ciągłą wentylację przestrzeni pierścieniowej. Po zaistnieniu zdarzenia awaryjnego i wzroście temperatury obudowy, ciepło przenoszone przez stalowe ścianki zbiornika obudowy jest przekazywane strumieniowi powietrza w pierścieniu wewnętrznym. Ogrzane powietrze ma mniejszą gęstość od powietrza w pierścieniu zewnętrznym, co powoduje intensyfikację naturalnej cyrkulacji. Jednocześnie woda ze zbiornika PCCWST spływa po zewnętrznej powierzchni zbiornika obudowy, odparowując i dodatkowo intensyfikując proces odprowadzania ciepła. System przegrody jest zaprojektowany tak, aby minimalizować opory aerodynamiczne. Zakrzywione profile na dole przegrody ułatwiają zmianę kierunku przepływu o 180° [1, 2, 3]. Przeniesienie funkcji odbioru ciepła na konstrukcję budowlaną ma również swoje ograniczenia. Wydajność systemu PCS zależy od warunków atmosferycznych: temperatury oraz wilgotności i ciśnienia powietrza pobieranego z otoczenia. W przypadku nadmorskiej lokalizacji Lubiato-Kopalino oznacza to konieczność uwzględnienia w analizach zarówno dużej wilgotności, ograniczającej odparowanie filmu wodnego, jak i agresywnego, zasolonego środowiska korozyjnego. Systemy pasywne, w odróżnieniu od aktywnych, są podatne na tzw. awarie funkcjonalne, polegające na niewytworzeniu lub zaniku cyrkulacji naturalnej mimo pełnej sprawności elementów konstrukcyjnych [11, 12]. Ograniczony jest też horyzont czasowy działania – zbiornik PCCWST zapewnia chłodzenie przez 72 h; zbiornik pomocniczy PCCAWST wydłuża ten okres do siódmej doby (nie jest on częścią systemu pasywnego, wymaga wykorzystania pomp), po czym konieczne staje się uzupełnianie wody ze źródeł zewnętrznych.

Wewnętrzne konstrukcje obudowy bezpieczeństwa i moduły strukturalne

Wewnętrzne struktury obudowy (Containment Internal Structures) obejmują wszystkie konstrukcje betonowe i stalowe zlokalizowane wewnątrz zbiornika obudowy. Stanowią one

the reactor cavity; the secondary shield walls; the IRWST tank; the walls of the refueling cavity; the floors, as well as various platforms and technological walkways [1].

The principal structural module is the module designated CA01, a multi-cell structure in the shape of the letter T, with dimensions of approximately $26.8 \times 29.0 \times 26.2$ m, composed of approximately forty prefabricated wall submodules [1], shown in Photo 3. The CA01 module performs a dual function from the perspective of the passive safety systems: it constitutes the load-bearing structure for the components of the primary cooling circuit (reactor vessel, steam generators, coolant pumps) and for the elements of the PXS system, but it also forms an integral part of the boundary of the IRWST tank, ensuring the retention of the water necessary for long-term core cooling. The vertical walls of the CA01 module separate the reactor cavity, the refueling cavity and the two steam generator cavities. After being joined and installed inside the containment, the hollow walls of the modules are filled with concrete, forming an integral steel-concrete structure [1]. The walls forming part of the IRWST boundary are made, on the side in contact with water, of duplex 2101 stainless steel plate (ASTM A240, S32101), whereas on the opposite side they are made of carbon steel. During the first series of projects, recurring problems were identified with the dimensional tolerances of the prefabricated submodules and with the quality of the welded joints of the faceplates. The problem was detected by NRC inspectors at the prefabrication facility in Lake Charles, where an inadequate quality assurance system was found at one of the subcontractors [13].

podporę w układzie chłodzenia reaktora, zapewniają osłonę radiacyjną oraz tworzą kluczowe zbiorniki systemu PXS. Do głównych elementów należą: osłona pierwotna reaktora; komora reaktora; osłony wtórne; zbiornik IRWST; ścianki basenu do wymiany paliwa; stropy oraz różne platformy i pomośty technologiczne [1].

Głównym modulem konstrukcyjnym jest moduł o oznaczeniu CA01, wielokomorowa struktura w kształcie litery T, o wymiarach ok. $26,8 \times 29,0 \times 26,2$ m), złożony z ok. czterdziestu prefabrykowanych podmodułów ściennych [1], przedstawiony na fotografii 3. Moduł CA01 pełni podwójną funkcję z perspektywy pasywnych systemów bezpieczeństwa: stanowi konstrukcję nośną w przypadku komponentów pierwotnego obiegu chłodzenia (zbiornik reaktora, wytwornice pary, pompy chłodziwa) oraz elementów systemu PXS, ale również tworzy integralną część granicy zbiornika IRWST, przechowującego wodę niezbędną do długoterminowego chłodzenia rdzenia. Pionowe ściany modułu CA01 wydzielają komorę reaktora, komorę do wymiany paliwa oraz dwie komory wytwornic pary. Po scaleniu i zamontowaniu wewnątrz obudowy, puste ścianki modułów są zalewane betonem, tworząc integralną konstrukcję zespoloną stalowo-betonową [1]. Ściany będące częścią granicy IRWST, są wykonane od strony kontaktu z wodą z blach ze stali nierdzewnej duplex 2101 (ASTM A240, S32101), natomiast po stronie przeciwnej – ze stali węglowej. Podczas pierwszej serii realizacji obiektów zidentyfikowano powtarzające się problemy z tolerancjami wymiarowymi prefabrykowanych podmodułów oraz z jakością połączeń spawanych blach okładzinowych. Problem wykryli inspektorzy NRC w zakła-



Photo 3. Structural module CA01 during installation into the containment vessel

Fot. 3. Moduł strukturalny CA01 w trakcie montażu do wnętrza obudowy bezpieczeństwa

The circumferential wall of the IRWST tank is formed by the CA03 module, which is a steel structure anchored in concrete. This wall extends from the level of the tank floor to the operating floor. It is made of stainless steel plate 15.875 mm thick, stiffened on the inside by vertical stainless steel tee sections at a spacing of 1.42 m and on the outside by circumferential carbon steel angles at a spacing of 0.46–0.61 m. The CA03 module is anchored to the adjacent modules and to the floor slab by means of mechanical connectors and reinforcing bars [1]. This wall constitutes a key element of the leak-tight boundary of the IRWST tank, on whose integrity the availability of water for the passive core cooling systems depends. The interior of the tank is shown in Photo 4.

The IRWST tank is located directly above the loops of the reactor cooling system. It simultaneously serves as a condensate collection tank, accumulating water for long-term core cooling under accident conditions, as a water source feeding the gravity injection system, and as a cooling pool for the PRHR HX heat exchanger. The minimum capacity of the water inventory inside the containment is 2067 m³ [1]. The welded joints of the steel plates form the leak-tight IRWST boundary, which is subject to liquid penetrant examination and to vacuum box leak testing of the welds. The leak-tightness of the IRWST tank is a necessary condition for long-term core cooling. This means that a workmanship defect in the building structure translates directly into a nuclear safety function. Experience from past project implementations [13] indicates that the declared benefits of modularization are conditional and become apparent only with adequate maturity of the supply chain.

Modularization as a key feature of the AP1000

The construction of the AP1000 plant is based on the use of modularization, in which all key structures are prefabricated in manufacturing facilities. The most important modules in the context of the passive safety systems include: CA01 (the central walls of the containment internal structures); CA03 (the circumferential wall of the IRWST tank); CB20 (the PCCWST tank integrated with the roof of the shield building); SC30 and SC40 (the steel-concrete panels of the cylindrical wall of the shield building); containment vessel plates and SB01 and SB02 (the air baffles). The modular approach makes it possible to transfer a significant part of the manufacturing work from the construction site to controlled factory conditions, which translates into bet-

ter prefabrykacji w Lake Charles, gdzie u jednego z podwykonawców stwierdzono niedostateczny system zapewnienia jakości [13].

Obwodową ścianę zbiornika IRWST stanowi moduł CA03, który jest stalową konstrukcją kotwioną w betonie. Ściana ta rozciąga się od poziomu dna zbiornika do płyty roboczej. Wykonana jest z blachy ze stali nierdzewnej o grubości 15,875 mm, usztywnionej od wewnątrz pionowymi słupkami teowymi ze stali nierdzewnej w rozstawie 1,42 m oraz od zewnątrz obwodowymi kątownikami ze stali węglowej w rozstawie 0,46–0,61 m. Moduł CA03 jest kotwiony do przylegających modułów i płyty podłogowej za pomocą łączników mechanicznych i prętów zbrojeniowych [1]. Ściana ta stanowi kluczowy element szczelnej granicy zbiornika IRWST, od którego integralności zależy dostępność wody do pasywnych systemów chłodzenia rdzenia. Wnętrze zbiornika pokazano na fotografii 4.



Photo 4. Module CA03, interior of the IRWST tank
Fot. 4. Moduł CA03, wnętrze zbiornika IRWST

Zbiornik IRWST zlokalizowany jest bezpośrednio nad pętłami układu chłodzenia reaktora. Pełni on jednocześnie funkcję zbiornika kondensacyjnego, gromadzącego wodę do długoterminowego chłodzenia rdzenia w warunkach awaryjnych, źródła wody zasilającego system wtrysku grawitacyjnego oraz basenu chłodzącego w przypadku wymiennika ciepła PRHR HX. Minimalna pojemność zapasów wody wewnątrz obudowy wynosi 2067 m³ [1]. Połączenia spawane płyt stalowych tworzą szczelną granicę IRWST podlegającą badaniom penetracyjnym i badaniom szczelności spoin komorą próżniową. Szczelność zbiornika IRWST jest warunkiem koniecznym długoterminowego chłodzenia rdzenia. Oznacza to, że wada wykonawstwa konstrukcji budowlanej przekłada się bezpośrednio na funkcję bezpieczeństwa jądowego. Doświadczenia z przeszłych realizacji projektów [13] wskazują, że deklarowane korzyści modularyzacji są warunkowe i ujawniają się dopiero przy odpowiedniej dojrzałości łańcucha dostaw.

wego chłodzenia rdzenia. Oznacza to, że wada wykonawstwa konstrukcji budowlanej przekłada się bezpośrednio na funkcję bezpieczeństwa jądowego. Doświadczenia z przeszłych realizacji projektów [13] wskazują, że deklarowane korzyści modularyzacji są warunkowe i ujawniają się dopiero przy odpowiedniej dojrzałości łańcucha dostaw.

Modularyzacja jako cecha wyróżniająca AP1000

Budowa elektrowni AP1000 bazuje na wykorzystaniu modularyzacji, gdzie wszystkie kluczowe konstrukcje są prefabrykowane w zakładach produkcyjnych. Do najważniejszych modułów w kontekście pasywnych systemów bezpieczeństwa należą: CA01 (centralne ściany wewnętrznych struktur obudowy); CA03 (obwodowa ściana zbiornika IRWST); CB20 (zbiornik PCCWST zintegrowany z dachem budynku osłono-

ter quality of welds and connections, a shortened construction schedule and reduced congestion on the construction site [15]. Most of the structural modules of the nuclear island are divided into submodules, which are transported to the construction site by road, rail or sea; for example, the CA01 module consists of approximately forty submodules (typical submodule mass: 9–11 tonnes), which are joined together on the construction site in an assembly building. The assembled CA01 module is lifted by a crane of sufficiently high capacity and set in its final location inside the steel containment vessel. Subsequently, the empty spaces between the steel plates are filled with concrete, forming a steel-concrete composite structure. The modular approach of the AP1000 creates a significant opportunity for Polish enterprises in the steel and welding sector which have experience in the prefabrication of welded steel structures, provided that they meet the rigorous requirements of nuclear quality assurance systems [4, 5].

Modularization is a further feature that distinguishes the AP1000 from other Generation III and III+ designs. The design comprises more than 270 modules, divided into structural, mechanical and electrical modules, with the nuclear island subdivided into large-scale modules whose erection requires a heavy-lift derrick. In this approach, construction is carried out by installing the modules by lowering them into the interior of the building with a crane, instead of introducing them through erection openings, through the open roof of the reactor (open-top). The benefits of applying modularization are as follows: the possibility of carrying out construction work in parallel; the prefabrication of modules in the manufacturing facility proceeds simultaneously with earthworks and foundation works on the construction site, and consequently a significant part of the welding and quality control is transferred to factory conditions. It is estimated that work carried out in a manufacturing facility may be several times more productive than work performed in situ [16].

Analyses of the degree of modularization of the AP1000 indicate that modular solutions covered approximately 31.4% of the concrete of the containment building and approximately 16.5% of the concrete of the auxiliary building, whereas mechanical modules account for only approximately 1% of the total cost of the facility [16]. When cost indicators are compared, a prefabricated steel structure proves to be several times more expensive than an equivalent executed by the traditional method, and the economic balance becomes favourable only through a shortening of the work schedule and the resulting reduction of financing costs [16]. Modularization is therefore profitable only if the assumed shortening of the construction cycle is actually achieved. The open-top method additionally introduces dependence on atmospheric conditions, the risk of contamination of the interior of the facility, and a rigid erection sequence. A delay in the delivery of a single module blocks subsequent crane operations and affects the entire schedule [13]. Typical difficulties also include the need to store oversized elements on the construction site, large advance payments, and the requirement for strict coordination of numerous suppliers. Modularization

wego); SC30 i SC40 (panele stalowo-betonowe ściany cylindrycznej budynku osłonowego); płyty stalowe obudowy bezpieczeństwa CV oraz SB01 i SB02 (przegrody powietrzne). Podejście modułowe pozwala na przeniesienie znacznej części prac wytwórczych z placu budowy do kontrolowanych warunków fabrycznych, co przekłada się na lepszą jakość spoin i połączeń, skrócenie harmonogramu budowy oraz ograniczenie zatłoczenia na placu budowy [15]. Większość modułów strukturalnych wyspy jądrowej jest dzielona na podmoduły, które są transportowane na plac budowy transportem drogowym, kolejną lub drogą morską, np. moduł CA01 składa się z ok. czterdziestu podmodułów (typowa masa podmodułu: 9–11 ton), które są scalane na miejscu budowy w budynku montażowym. Gotowy moduł CA01 jest podnoszony przez dźwig z odpowiednio dużym udźwigiem i osadzany w docelowej lokalizacji wewnątrz stalowego zbiornika obudowy. Następnie puste przestrzenie między płytami stalowymi są wypełniane betonem, tworząc konstrukcję kompozytową stalowo-betonową. Podejście modułowe AP1000 stwarza istotną szansę polskim przedsiębiorstwom branży stalowej i spawalniczej, posiadającym doświadczenie w prefabrykacji spawanych konstrukcji stalowych, pod warunkiem spełnienia rygorystycznych wymagań jądrowych systemów zapewnienia jakości [4, 5].

Modularyzacja jest kolejną cechą, która odróżnia AP1000 od pozostałych projektów generacji III i III+. Projekt obejmuje ponad 270 modułów, podzielonych na strukturalne, mechaniczne i elektryczne, przy czym wyspę jądrową rozdzielono na wielkogabarytowe moduły, których montaż wymaga żurawia masztowego o dużym udźwigu. W tym podejściu realizacja budowy polega na montażu modułów przez opuszczanie ich do wnętrza obiektu dźwigiem, zamiast wprowadzania otworami montażowymi przez otwarty dach reaktora (open-top). Korzyści zastosowania modularyzacji są następujące: możliwość prowadzenia równoległe prac budowlanych; prefabrykacja modułów w wytwórni przebiega jednocześnie z robotami ziemnymi i fundamentowymi na placu budowy, a co za tym idzie przeniesienie znacznej części spawalnictwa i kontroli jakości do warunków fabrycznych. Szacuje się, że praca wykonana w wytwórni może być nawet kilkakrotnie bardziej wydajna niż realizowana in situ [16].

Analizy stopnia modularyzacji AP1000 wskazują, że rozwiązaniami modułowymi objęto ok. 31,4% betonu budynku obudowy oraz ok. 16,5% betonu budynku pomocniczego, natomiast moduły mechaniczne odpowiadają jedynie za ok. 1% całkowitego kosztu obiektu [16]. Przy porównaniu wskaźników kosztowych prefabrykowana konstrukcja stalowa okazuje się kilkakrotnie droższa od odpowiednika wykonanego metodą tradycyjną, a rachunek ekonomiczny jest opłacalny dopiero przez skrócenie harmonogramu prac i wynikające z niego ograniczenie kosztów finansowania [16]. Modularyzacja jest zatem opłacalna tylko wtedy, gdy zakładane skrócenie cyklu budowy zostanie faktycznie osiągnięte. Metoda z otwartym dachem (open-top) wprowadza ponadto zależność od warunków atmosferycznych, ryzyko zanieczyszczenia wnętrza obiektu oraz sztywną sekwencję montażu. Opóźnienie dostawy jednego modułu blokuje kolejne operacje dźwigowe i oddziałuje na cały harmonogram [13]. Do typowych trudności należy

therefore shifts the risk from the erection phase to the phase of prefabrication and supply chain management and it was precisely there that the main problems of the first series of units became apparent.

Experience from the construction of AP1000 units, evolution of the design documentation

By 2024, eight units of the first AP1000 series had been completed: Sanmen 1 and 2 and Haiyang 1 and 2 in China, Vogtle 3 and 4 in the United States, as well as two V.C. Summer units whose construction was discontinued. These projects provided extensive research material allowing the design assumptions to be verified. The actual construction time of the first series, measured from first nuclear concrete to commercial operation, amounted to 8–9 years in China and 10–11 years in the case of Vogtle, against the assumed 4–5 years. Among the key lessons learned from the first series the following are cited: the need to complete the detailed design before the start of construction (at Vogtle, more than 180 license amendment requests were submitted while construction was already under way); the performance of a constructability review of the documentation (an independent audit of the V.C. Summer project demonstrated that the issued documentation was often not feasible to execute in practice); ensuring an effective quality system at the suppliers of prefabricated modules, and early investment in the qualifications of the construction workforce. In the case of modularized structures this means that **success is determined by the prefabrication stage preceding the pouring of the first concrete**, and not by the erection phase itself [13].

The significance of the transfer of experience is well illustrated by a comparison of the two Chinese series. The second series of CAP1000/CAP1400 units, begun in the years 2022–2025 at Sanmen, Haiyang, Lianjiang, Xudabao and Lufeng, shows a reduction of the average time to reach milestones measured from first nuclear concrete of approximately 48%, and a reduction of the average time between milestones of approximately 42% relative to the first series, together with a reduction of the variance of these values by approximately 60% and 46% respectively. This applies to the erection stages of the civil structures: for the CA20 module (auxiliary building) the reduction amounted to approximately 48%, for the CA03 module (circumferential wall of the IRWST) approximately 50%, for the erection of the reactor vessel approximately 56%, and for the containment top head approximately 51%. These results were achieved thanks to a competent domestic supply chain, a share of domestic components (local content) above 80%, adaptation of the construction works to local standards, centralization of the database of lessons learned from projects previously carried out at various sites, and continuity of orders [13].

The technical description of the structures presented in this article was prepared on the basis of the AP1000 Design Control Document in Revision 19, since this is the last revision approved by the U.S. nuclear regulator and constituting the binding basis of the certified design. The certification remains valid for referencing by combined license (COL) applications until 27 Febru-

także konieczność składowania wielkogabarytowych elementów na placu budowy, duże płatności zaliczkowe oraz wymaganie ścisłej koordynacji wielu dostawców. Modularyzacja przenosi zatem ryzyko z fazy montażu do fazy prefabrykacji i zarządzania łańcuchem dostaw i tam właśnie ujawniły się główne problemy pierwszej serii bloków.

Doświadczenia z realizacji bloków AP1000, ewolucja dokumentacji projektowej

Do 2024 r. ukończono osiem bloków pierwszej serii AP1000: Sanmen 1 i 2 oraz Haiyang 1 i 2 w Chinach, Vogtle 3 i 4 w Stanach Zjednoczonych, a także dwa bloki V.C. Summer, których budowę przerwano. Realizacje te dostarczyły obszerny materiał badawczy pozwalający zweryfikować założenia projektowe. Rzeczywisty czas budowy pierwszej serii, liczony od pierwszego betonu jądrowego do eksploatacji komercyjnej, wyniósł 8–9 lat w Chinach i 10–11 lat w przypadku Vogtle, wobec zakładanych 4–5 lat. Wśród kluczowych lekcji wyciągniętych z pierwszej serii wymienia się: konieczność ukończenia projektu wykonawczego przed rozpoczęciem budowy (w Vogtle złożono ponad 180 wniosków o zmianę licencji już w trakcie realizacji); przeprowadzenie przeglądu wykonalności konstrukcyjnej dokumentacji (niezależny audyt projektu V.C. Summer wykazał, że wydana dokumentacja często nie była możliwa do zrealizowania w praktyce); zapewnienie skutecznego systemu jakości u dostawców prefabrykatów modułów oraz wczesne inwestycje w kwalifikacje kadry wykonawczej. W przypadku zmodularyzowanych konstrukcji oznacza to, że **o powodzeniu decyduje etap prefabrykacji**, poprzedzający wylanie pierwszego betonu, a nie sama faza montażu [13].

Znaczenie transferu doświadczeń dobrze ilustruje porównanie dwóch serii chińskich. Druga seria bloków CAP1000/CAP1400, rozpoczęta w latach 2022–2025 w Sanmen, Haiyang, Lianjiang, Xudabao i Lufeng, wykazuje skrócenie średniego czasu osiągnięcia kamieni milowych liczonego od pierwszego betonu jądrowego o ok. 48% oraz skrócenie średniego czasu pomiędzy kamieniami milowymi o ok. 42% względem serii pierwszej, przy jednoczesnym zmniejszeniu wariancji tych wartości odpowiednio o ok. 60% i 46%. Dotyczy to etapów montażu konstrukcji budowlanych: w przypadku modułu CA20 (budynek pomocniczy) skrócenie wyniosło ok. 48%, w przypadku modułu CA03 (obwodowa ściana IRWST) ok. 50%, a w przypadku montażu zbiornika reaktora ok. 56%, a górnej pokrywy obudowy bezpieczeństwa ok. 51%. Osiągnięto je dzięki kompetentnemu krajowemu łańcuchowi dostaw, udziałowi komponentów krajowych (local content) powyżej 80%, dostosowaniu robót budowlanych do norm miejscowych, scentralizowaniu bazy danych dotyczących wniosków wyciągniętych z dotychczasowych realizacji projektów w różnych lokalizacjach oraz ciągłości zamówień [13].

Opis techniczny konstrukcji przedstawiony w artykule przygotowany na podstawie dokumentu AP1000 Design Control Document w rewizji 19, ponieważ jest to ostatnia rewizja zatwierdzona przez amerykański dozór jądrowy i stanowiąca obowiązującą podstawę certyfikowanego projektu. Certyfikat pozostaje ważny do referencjonowania przez wnioski o licencję łączoną (COL) do 27 lutego 2046 r. Dokumentacja podlega jednak obecnie istotnej aktualizacji. 27 marca 2026 r.

ary 2046. The documentation is, however, currently undergoing a significant update. On 27 March 2026, Westinghouse submitted an application for renewal of the certification together with an application for the incorporation of DCD Revision 20 [17], and on 27 April 2026 the NRC accepted the application for detailed review. An exemption from the timing requirements of 10 CFR 52.57 (a) was granted on 24 June 2026. As at the date of preparation of this article, Revision 19 therefore remains the only certified version of the documentation. The essential difference is that Revision 19 constituted the basis for commencing construction, whereas Revision 20 reflects the as-built configuration, based on the Vogtle 4 reference unit. It incorporates approximately 200 license amendments and departures approved during construction, without introducing new design changes. From the perspective of civil structures the following are significant: the refinement of the design criteria for the composite steel-concrete SC panels of the shield building (faceplates, internal trusses, tie bars, connections of the composite panels with the reinforced concrete foundation); the inclusion of reconciliation reports addressing deviations in wall thickness and dimensional tolerances arising during construction; the refinement of the requirements for the zinc coating of the containment above the operating deck; and the introduction of a section standardizing the handling of nonconformances of structural modules arising at the prefabrication stage. Revision 20 also contains an optimization of the arrangement of the IRWST tank vents, resulting from analyses indicating the possibility of excessive thermal loading of the steel containment shell by hydrogen diffusion flames. The arrangement was modified so that only the vents remote from the walls of the containment vessel open, which eliminates the risk of their incorrect operation. The fact that a significant part of the changes in Revision 20 concerns workmanship tolerances and procedures for handling nonconformances confirms the thesis put forward earlier, namely that the critical area of the AP1000 technology is not the structural concept but its repeatable execution.

Comparison of the AP1000 with other Generation III and III+ reactor technologies

An assessment of the innovativeness of the structural solutions of the AP1000 requires that they be related to contemporary competing designs. Three pressurized water reactor designs present on the market were selected for comparison: the French EPR; the Korean APR1400 and the Chinese HPR1000 [18]. A summary of their basic features, with particular emphasis on the structural solutions of the containment, on safety, and on the construction technology, is presented in the Table.

The AP1000 is the only reactor in which the inner containment is a free-standing steel structure. The EPR and HPR1000 reactors have double concrete containments with a steel liner, and the APR1400 has a single containment. In these designs the steel liner performs solely a sealing function, and not the function of a heat transfer surface. The consequence of this choice is a different method of heat removal from the containment. The principal difference between the compared technologies is a different philosophy of ensuring safety. The AP1000 bases its key safety functions primarily on passive systems and natural phenomena,

Westinghouse złożył wniosek o odnowienie certyfikacji wraz z wnioskiem o włączenie rewizji 20 DCD [17], a 27 kwietnia 2026 r. NRC przyjęło wniosek do szczegółowego rozpatrzenia. Odstępstwo od wymagań terminowych 10 CFR 52.57 (a) przyznano 24 czerwca 2026 r. Na dzień przygotowania artykułu rewizja 19 pozostaje zatem jedyną certyfikowaną wersją dokumentacji. Zasadnicza różnica polega na tym, że rewizja 19 stanowiła podstawę do rozpoczęcia budowy, natomiast rewizja 20 odzwierciedla konfigurację powykonawczą, bazującą na bloku referencyjnym Vogtle 4. Włącza ona ok. 200 poprawek licencyjnych i odstępstw zatwierdzonych w trakcie budowy, bez wprowadzania nowych zmian projektowych. Z perspektywy konstrukcji budowlanych istotne są: doprecyzowanie kryteriów projektowych paneli kompozytowych, stalowo-betonowych SC budynku osłonowego (płyty licowe, kratownice wewnętrzne, pręty łączące, połączenia płyt kompozytowych z fundamentem żelbetowym); włączenie raportów łagodzących odchylenia grubości ścian i tolerancji wymiarowych powstałe podczas budowy, doprecyzowanie wymagań powłoki cynkowej obudowy bezpieczeństwa powyżej pokładu operacyjnego oraz wprowadzenie sekcji porządkującej postępowanie z niezgodnościami modułów strukturalnych powstałych na etapie prefabrykacji. Rewizja 20 zawiera również optymalizację układu odpowietrzników zbiornika IRWST, wynikającą z analiz wskazujących na możliwość nadmiernego obciążenia cieplnego stalowej powłoki obudowy przez dyfuzyjne płomienie wodoru. Układ zmieniono tak, aby otwierały się tylko odpowietrzniki oddalone od ścian zbiornika bezpieczeństwa, co eliminuje ryzyko błędnego ich działania. Fakt, że znaczna część zmian rewizji 20 dotyczy tolerancji wykonawczych i procedur postępowania z niezgodnościami, potwierdza tezę postawioną wcześniej, że krytycznym obszarem technologii AP1000 nie jest koncepcja konstrukcyjna, lecz jej powtarzalna realizacja.

Porównanie AP1000 z innymi technologiami reaktorów generacji III i III+

Ocena innowacyjności rozwiązań konstrukcyjnych AP1000 wymaga odniesienia ich do współczesnych projektów konkurencyjnych. Do porównania wybrano trzy konstrukcje wodnych reaktorów ciśnieniowych obecne na rynku: francuski EPR; koreański APR1400 oraz chiński HPR1000 [18]. Zestawienie ich podstawowych cech, ze szczególnym uwzględnieniem rozwiązań konstrukcyjnych obudowy, bezpieczeństwa oraz technologii wykonania, przedstawiono w tabeli.

AP1000 jest jedynym reaktorem, w którym wewnętrzną obudowę bezpieczeństwa stanowi wolnostojąca konstrukcja stalowa. Reaktory EPR i HPR1000 mają podwójne obudowy betonowe z wykładziną stalową, a APR1400 obudowę pojedynczą. Wykładzina stalowa pełni w nich wyłącznie funkcję uszczelniającą, a nie funkcję powierzchni wymiany ciepła. Konsekwencją tego wyboru jest odmienny sposób odbioru ciepła z obudowy. Główną różnicą pomiędzy porównywanymi technologiami jest odmienna filozofia zapewnienia bezpieczeństwa. AP1000 opiera kluczowe funkcje bezpieczeństwa przede wszystkim na systemach pasywnych i zjawiskach na-

Comparison of Generation III and III+ reactors in terms of structural solutions and construction technology (own study based on [1, 13, 16, 18])

Porównanie reaktorów generacji III i III+ pod względem rozwiązań konstrukcyjnych oraz technologii wykonania (Opracowanie własne na podstawie [1, 13, 16, 18])

Feature	AP1000	EPR	APR1400	HPR1000
General characteristics				
Supplier/country of origin	Westinghouse, USA	Framatome/EDF, France	KHNP, KEPCO, South Korea	CNNC/CGN, China
Type/number of primary circuit loops	PWR, 2 loops	PWR, 4 loops	PWR, 2 loops (4 cold legs)	PWR, 3 loops
Thermal/electrical output (approx.)	3415 MWt/1110 MWe	4500 MWt/1650 MWe	3983 MWt/1400 MWe	3050 MWt/1150 MWe
Units in operation (examples)	Sanmen 1–2, Haiyang 1–2, Vogtle 3–4	Taishan 1–2, Olkiluoto 3, Flamanville 3	Shin-Kori 3–4, Barakah 1–4	Fuqing 5–6, Karachi K-2/K-3
Structural solutions and safety systems				
Containment	free-standing SA-738 Gr. B steel vessel within a concrete shield building	double concrete: prestressed concrete with steel liner + reinforced concrete	single prestressed concrete with steel liner	double concrete: prestressed concrete with liner + reinforced concrete
Heat removal from containment	passive (PCS): gravity and natural convection, 72 h without power supply	active; additionally a core catcher	active (spray) + reactor cavity flooding	combined: passive (PCS) and active
Emergency core cooling	passive (PXS): CMT, ACC, IRWST, PRHR HX	active, 4 redundant trains	active, 4 trains with direct vessel injection (DVI) + IRWST	active (3 trains) + passive residual heat removal
Molten core retention	in-vessel retention (IVR), cavity flooding with water from the IRWST	ex-vessel – core catcher	reactor cavity flooding	in-vessel/cavity flooding
Construction technology and modularization				
Predominant construction method, degree of modularization	modular with top-down (open-top) installation, in-situ concreting, high degree of modularization	monolithic, in-situ concreting, low degree of modularization	mixed, in-situ concreting with selective top-down module installation, medium degree of modularization	mixed, in-situ concreting with an increasing share of prefabrication, medium degree of modularization
Types of modules	structural (large-scale, small-scale), mechanical and electrical, architectural	containment liner segments, reinforcement cages, equipment modules	steel-concrete modules, mechanical, electrical, prefabricated reinforcement assemblies	steel liner modules, reinforcement modules, equipment modules
Main technological limitations	rigid erection sequence, dependence on weather conditions, dimensional tolerances of submodules, prefabrication quality	design complexity limiting constructability, labour intensity of reinforcement works, long concreting cycle, weather conditions	predominant share of monolithic works, limited degree of modularization, high labour intensity of reinforcement and concreting, weather conditions	double concrete containment necessitates a long cycle of monolithic works, weather conditions

whereas the EPR and APR1400 rely primarily on redundant active systems, and the HPR1000 combines both approaches.

These designs differ fundamentally in their construction technology. The AP1000 is executed by the modular method with top-down installation, in which the tie bars, flat bars, shear studs and composite SC panels serve simultaneously as per-

turalnych, podczas gdy EPR i APR1400 wykorzystują przede wszystkim zwielokrotnione układy aktywne, a HPR1000 łączy oba podejścia.

Projekty te różnią się zasadniczo technologią wykonania. AP1000 realizowany jest metodą modułową z montażem od góry, w której pręty ściągające, płaskowniki, kołki zespalające

manent formwork and as surface reinforcement, eliminating traditional reinforcement and formwork operations. The EPR remains a monolithic structure, cast in situ, with very dense bar reinforcement, whose labour intensity is indicated in the literature as a factor limiting the constructability of the design. The APR1400 reactor represents a greater degree of modularization than the EPR. Composite SC modules as well as mechanical and electrical modules are designed in it, while the dominant role of monolithic works is retained. The HPR1000 draws on the experience of the CPR1000 programme, including the modularization of the steel containment liner, but the double concrete containment necessitates a long cycle of in-situ works.

Regulatory requirements and the Polish context

The construction and operation of an AP1000 nuclear power plant in Poland will require compliance with numerous rigorous national standards and international technical standards ensuring the highest level of nuclear safety and radiological protection. The foundation of the national legal framework consists of two key acts: the Atomic Law Act [19], being the principal legal act regulating the safe use of nuclear energy (pursuant to Article 36b of this Act, the design may not employ solutions which have not previously been proven in practice or confirmed by detailed tests and analyses), and the Act on Technical Inspection, defining the principles of supervision over technical equipment exercised by the Office of Technical Inspection (UDT). These are supplemented by implementing regulations, including the Regulation of the Council of Ministers on the nuclear safety and radiological protection requirements to be taken into account in the design of a nuclear facility; and the regulations concerning technical inspection in a nuclear power plant, specifying 14 groups of equipment subject to inspection and the detailed technical conditions for their design, manufacture and operation [20, 21].

From the point of view of the AP1000 technology supplier, standards originating from the USA are of key importance and must be agreed with the Polish supervisory authorities. In the case of the structures under discussion these are ASME BPVC Section III [7] (rules for the construction of components of nuclear facilities, applied to equipment of safety classes 1, 2, 3), ACI 349 (reinforced concrete structures) [9] and ANSI/AISC N690 (steel structural modules, air baffle) [10]. The ASME NQA-1 standard [22], specifying quality assurance requirements in the design, manufacture and construction of nuclear facilities, is also of significant importance.

The adaptation of the American normative base to the Polish legal order nevertheless gives rise to specific problems which, at the present stage of the investment, remain unresolved. The first of these is the ambiguity of the safety classification. The technology supplier uses a classification in which classes A, B and C correspond to the concept of safety-related within the meaning of 10 CFR 50.2, class D covers equipment not formally classified as safety-related but subject to increased quality requirements, and classes E and F are not related to nuclear safety. The American concept of safety-related is at the same

oraz panele kompozytowe SC pełnią jednocześnie funkcję deskowania traconego i zbrojenia powierzchniowego, eliminując tradycyjne roboty zbrojarskie i deskowaniowe. EPR pozostaje konstrukcją monolityczną, betonowaną in situ, z bardzo gęstym zbrojeniem prętowym, którego pracochłonność wskazywana jest w literaturze jako czynnik ograniczający wykonalność projektu. Reaktor APR1400 reprezentuje większy stopień modularyzacji niż EPR. Zaprojektowane są w nim moduły zespolone SC oraz moduły mechaniczne i elektryczne z zachowaniem dominującej roli robót monolitycznych. HPR1000 wykorzystuje doświadczenia programu CPR1000, w tym modularyzację stalowej wykładziny obudowy, lecz podwójna obudowa betonowa wymusza długi cykl robót in situ.

Wymagania regulacyjne i kontekst polski

Budowa i eksploatacja elektrowni jądrowej AP1000 w Polsce będzie wymagała spełnienia wielu rygorystycznych norm krajowych oraz międzynarodowych standardów technicznych, zapewniających najwyższy poziom bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej. Fundamentem krajowych ram prawnych są dwie kluczowe ustawy: ustawa Prawo Atomowe [19], stanowiąca główny akt prawny regulujący bezpieczne wykorzystanie energii jądrowej (zgodnie z art. 36b tej ustawy w projekcie nie można stosować rozwiązań, które nie zostały wcześniej sprawdzone w praktyce lub potwierdzone szczegółowymi badaniami i analizami) oraz ustawa o dozorcze technicznym, określająca zasady nadzoru nad urządzeniami technicznymi sprawowanego przez Urząd Dozoru Technicznego (UDT). Uzupełniają je rozporządzenia wykonawcze, w tym rozporządzenie Rady Ministrów w sprawie wymagań bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej, jakie ma uwzględniać projekt obiektu jądrowego; rozporządzenia dotyczące dozoru technicznego w elektrowni jądrowej, określające 14 grup urządzeń podlegających dozorowi oraz szczegółowe warunki techniczne ich projektowania, wytwarzania i eksploatacji [20, 21].

Z punktu widzenia dostawcy technologii AP1000 kluczowe znaczenie mają standardy pochodzące z USA, które muszą być uzgodnione z polskimi organami dozoru. W przypadku omawianych konstrukcji są to ASME BPVC Section III [7] (zasady budowy komponentów obiektów jądrowych, stosowane do urządzeń klasy bezpieczeństwa 1, 2, 3), ACI 349 (konstrukcje żelbetowe) [9] oraz ANSI/AISC N690 (stalowe moduły konstrukcyjne, przegroda powietrzna) [10]. Istotne znaczenie ma również norma ASME NQA-1 [22], określająca wymagania zapewnienia jakości w projektowaniu, produkcji i budowie obiektów jądrowych.

Adaptacja amerykańskiej bazy normatywnej do polskiego porządku prawnego rodzi jednak konkretne problemy, które na obecnym etapie inwestycji pozostają nierozstrzygnięte. Pierwszym z nich jest niejednoznaczność klasyfikacji bezpieczeństwa. Dostawca technologii posługuje się klasyfikacją, w której klasy A, B i C odpowiadają pojęciu safety-related (związane z bezpieczeństwem) w rozumieniu 10 CFR 50.2, klasa D obejmuje urządzenia formalnie niezaliczone do safety-related, lecz o zwiększonych wymaganiach dotyczących jakości, a klasy E i F są niezwiązane z bezpieczeństwem jądrowym. Amerykań-

time narrower than the concept of systems important to safety used by the IAEA [23]. Polish regulations cover both of these sets: equipment with an assigned safety class (§ 4.1) and equipment of non-zero significance for safety to which no class has been assigned (§ 4.2 of the regulation on technical inspection in a nuclear power plant) [20, 24].

Another identified problem is the divergence of quality assurance systems. The design and manufacture of components in accordance with ASME Section III [7] requires the implementation of the ASME NQA-1 standard [22], whereas the European and Polish standard concerning the supply chain of the nuclear sector is PN-EN ISO 19443 [25], which extends ISO 9001. Both standards pursue the same objective, but by different means: NQA-1 specifies in detail the methods of meeting the requirements and refers to specific ASME standards, whereas ISO 19443 formulates process requirements.

A separate issue remains the reconciliation of the systems for qualifying welding procedures and welding personnel according to American standards. As at the date of preparation of this article, however, it is not known how the American standards will be adapted and their conformity with the European equivalents of design, execution and quality standards confirmed. The final decision rests with the PAA, with the support of the UDT, the investing company and the technology supplier. Pursuant to Article 9 of the Act on Technical Inspection, plants manufacturing components important to nuclear safety, such as steel modules or pressure vessels, must hold authorizations issued by the President of the UDT [20]. The amended Polish Nuclear Power Programme assumes the construction of units with a total capacity of 6–9 GWe by 2043 [5].

Conclusions

In the AP1000 nuclear power plant, civil structures not only provide structural support for the safety systems but are also an integral part of them. The steel containment is simultaneously a pressure barrier and a heat transfer surface, the shield building integrates the PCCWST tank, the air inlets and the chimney into a closed cooling circuit, and the CA01 and CA03 modules combine a load-bearing function with the leak-tight boundary of the IRWST tank. The consequence of this solution is a change in the perception of structural data, such as geometry, dimensional tolerances, the leak-tightness of welded joints or the condition of protective coatings. They are no longer merely a geometric description or a measure of durability, but have become parameters of nuclear safety.

The transfer of safety functions onto the civil structure shifts the risk of the project from the operational phase to the design and manufacturing phases. Experience from the completed units indicates that the critical stage is prefabrication rather than erection, while the causes of delays were not deficiencies of the structural concept but of the detailed design documentation and of the quality systems at the suppliers. This leads to the conclusion that the benefits of modularization are not a feature of the design but a function of the maturity of the supply chain and of the competence of the contractors, and that achieving them conditions the profitability of the entire project.

skie pojęcie safety-related jest przy tym węższe od stosowanego przez IAEA pojęcia systems important to safety (systemy istotne dla bezpieczeństwa) [23]. Polskie przepisy obejmują oba te zbiory: urządzenia z przypisaną klasą bezpieczeństwa (§ 4.1) oraz urządzenia o niezerowym znaczeniu dla bezpieczeństwa, którym klasy nie przypisano (§ 4.2 rozporządzenia w sprawie dozoru technicznego w elektrowni jądrowej) [20, 24].

Innym zidentyfikowanym problemem jest rozbieżność systemów zapewnienia jakości. Projektowanie i wytwarzanie komponentów zgodnych z ASME Section III [7] wymaga wdrożenia normy ASME NQA-1 [22], podczas gdy europejskim i polskim standardem dotyczącym łańcucha dostaw sektora jądrowego jest PN-EN ISO 19443 [25], rozszerzająca ISO 9001. Obie normy realizują ten sam cel, lecz odmiennymi środkami: NQA-1 określa szczegółowo sposoby spełnienia wymagań i odsyła do konkretnych standardów ASME, natomiast ISO 19443 formułuje wymagania procesowe.

Odrębnym zagadnieniem pozostaje uzgodnienie systemów kwalifikowania technologii spawania i personelu spawalniczego wg standardów amerykańskich. Na dzień przygotowania artykułu nie wiadomo jednak, w jaki sposób zostaną zaadaptowane normy amerykańskie oraz potwierdzona ich zgodność z odpowiednikami europejskimi norm projektowych, wykonawczych i jakościowych. Za finalną decyzję odpowiada PAA wraz ze wsparciem UDT, spółką celową oraz dostawcą technologii. Na mocy art. 9 ustawy o dozorze technicznym, zakłady produkujące komponenty istotne dla bezpieczeństwa jądrowego, takie jak moduły stalowe czy zbiorniki ciśnieniowe, muszą posiadać uprawnienia wydane przez Prezesa UDT [20]. Znowelizowany Program Polskiej Energetyki Jądrowej zakłada budowę bloków o łącznej mocy 6–9 GWe do 2043 r. [5].

Wnioski

W elektrowni jądrowej AP1000 konstrukcje budowlane pełnią nie tylko funkcję nośną wobec systemów bezpieczeństwa, lecz stanowią ich integralną część. Stalowa obudowa bezpieczeństwa jest jednocześnie barierą ciśnieniową i powierzchnią wymiany ciepła, budynek osłonowy integruje zbiornik PCCWST, wloty powietrza i komin w zamknięty obieg chłodzący, a moduły CA01 i CA03 łączą funkcję nośną ze szczelną granicą zbiornika IRWST. Konsekwencją tego rozwiązania jest zmiana postrzegania danych konstrukcyjnych, takich jak geometria, tolerancje wymiarowe, szczelność połączeń spawanych czy stan powłok ochronnych. Przystają one być wyłącznie opisem geometrycznym czy miarą trwałości, a stają się parametrami bezpieczeństwa jądrowego.

Przeniesienie funkcji bezpieczeństwa na konstrukcję budowlaną przesuwają ryzyko przedsięwzięcia z fazy eksploatacji do faz projektowania i wytwarzania. Doświadczenia zrealizowanych bloków wskazują, że etapem krytycznym jest prefabrykacja, a nie montaż, natomiast przyczyną opóźnień nie były wady koncepcji konstrukcyjnej, lecz dokumentacji wykonawczej i systemów jakości u dostawców. Prowadzi to do wniosku, że korzyści modularyzacji nie są cechą projektu, lecz funkcją dojrzałości łańcucha dostaw i kompetencji wykonawczych, a ich osiągnięcie warunkuje opłacalność całego rozwiązania.

Compared to Generation III and III+ technologies, what sets the AP1000 apart is not the superiority of its structural materials, but rather the consistency with which the plant's architecture has been tailored to the principles of prefabrication. This solution nevertheless has certain limits, namely that the efficiency of passive heat removal depends on atmospheric conditions and on the condition of the external coatings of the containment.

In the Polish context, the implementation of the AP1000 project at the Lubiato-Kopalino site requires simultaneous compliance with Polish and international standards and regulations. This means that enterprises wishing to participate in the global supply chain for nuclear power must be prepared to implement rigorous design, manufacturing and quality standards, and this is the greatest challenge facing the Polish construction industry.

Research project supported by program „Excellence initiative – research university” for the AGH University of Krakow

Photos: Georgia Power Company [14]

Received: 09.03.2026

Revised: 25.05.2026

Published: 23.09.2026

Na tle porównywanych technologii generacji III i III+ wyróżnikiem AP1000 nie jest przewaga materiałowa konstrukcji, lecz konsekwencja, z jaką architekturę obiektu podporządkowano logice prefabrykacji. Rozwiązanie to ma jednak pewne granice, tj. sprawność pasywnego odbioru ciepła zależy od warunków atmosferycznych i od stanu powłok zewnętrznych obudowy.

W kontekście polskim realizacja projektu AP1000 w lokalizacji Lubiato-Kopalino wymaga jednoczesnego spełnienia norm i przepisów polskich oraz międzynarodowych. Oznacza to, że przedsiębiorstwa chcące uczestniczyć w globalnym łańcuchu dostaw do energetyki jądrowej muszą być przygotowane na wdrożenie rygorystycznych standardów projektowych, produkcyjnych, jakościowych i jest to największe wyzwanie stojące przed polskim przemysłem budowlanym.

Projekt badawczy finansowany ze środków programu „Inicjatywa doskonałości – uczelnia badawcza” realizowany w AGH w Krakowie

Fotografie: Georgia Power Company [14]

Artykuł wpłynął do redakcji: 09.03.2026 r.

Otrzymało poprawiony po recenzjach: 25.05.2026 r.

Opublikowano: 23.09.2026 r.

Literature

- [1] Westinghouse Electric Company, AP1000 Design Control Document, Revision 19, U.S. NRC ADAMS Accession No. ML11171A500.
- [2] Estévez-Albuja S, Fernandez-Cosials K, Vázquez-Rodríguez C, Goni-Velilla Z., Jiménez G. AP1000 Passive Containment Cooling System study under LBLOCA conditions using the GOTHIC code, Nuclear Engineering and Design, vol. 384, art. 111442, 2021; <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2021.111442>.
- [3] Lee DS, Liu ML, Hung TC, Tsai CH, Chen YT. Optimal structural analysis with associated passive heat removal for AP1000 shield building, Applied Thermal Engineering, vol. 50, pp. 207–216, 2013; <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.06.033>.
- [4] Niagaj J. Polski przemysł dla energetyki jądrowej, Wydawnictwo Sieć Badawcza Łukasiewicz, ISBN 978–83–969733–3–7, 2024.
- [5] Ministerstwo Klimatu i Środowiska, „Program Polskiej Energetyki Jądrowej,” 2024.
- [6] Zhao C, Ren L, Wang Z. Study on dynamic characteristics of AP1000 shield building for various water levels and air intakes. Progress in Nuclear Energy, vol. 70, pp. 176–187, 2014; <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2013.08.002>.
- [7] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III-Rules for Construction of Nuclear Facility Components
- [8] Sierczuła J. Analysis of selected steel structures in nuclear power facilities, IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., vol. 214, art. 012095, 2019; <https://doi.org/10.1088/1755-1315/214/1/012095>.
- [9] ACI CODE-349-23: Nuclear Safety-Related Concrete Structures–Code Requirements and Commentary
- [10] ANSI/AISC N690 Specification for Safety-Related Steel Structures for Nuclear Facilities.
- [11] Hashim M, Yoshikawa H, Matsuoka T, Yang M. Quantitative dynamic reliability evaluation of AP1000 passive safety systems by using FMEA and GO-FLOW methodology, Journal of Nuclear Science and Technology, vol. 51, no. 4, pp. 526–542, 2014; <https://doi.org/10.1080/00223131.2014.881727>
- [12] Olatubosun SA, Ayodeji A, Amidu MA. Safety assessment of AP1000: Common transients, analysis codes and research gaps, Nuclear Engineering and Design, 2021; <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2021.111100>
- [13] Spangler R, Qin S, Larsen LM, Bolisetti C, Abou-Jaoude A, Asgari M, Shirvan K, Stewart WR, Krellenstein J, Wilkinson G. Potential Cost Reduction

in New Nuclear Deployments Based on Recent AP1000 Experience, INL/RPT-25–84701, Idaho National Laboratory, 2025.

[14] Vogtle Construction Photo Archives. <https://vogtlegallery.georgiapower.com>

[15] Skiba K, Kinasz R. Wpływ modularyzacji obiektu elektrowni jądrowej na efektywność realizacji przedsięwzięcia budowlanego, Awaryjne budowlane 2026: zapobieganie, diagnostyka, naprawy, rekonstrukcje: May 18–22, 2026, Międzyzdroje, Poland. – ISBN: 978-83-7663-402-9. – s. 297–306

[16] Wrigley PA, Wood P, O'Neill S, Hall R, Robertson D. Off-site modular construction and design in nuclear power: A systematic literature review, Progress in Nuclear Energy, vol. 134, art. 103664, 2021; <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.103664>

[17] Westinghouse Electric Company, “AP1000 Design Certification Renewal Application and Amendment Request – Revision 20 of the AP1000 Design Control Document”, 27.03.2026, ADAMS ML26086A408, ML26086A412.

[18] International Atomic Energy Agency, Advanced Reactors Information System (ARIS) – Status reports: EPR, APR1400, HPR1000, Vienna.

[19] Ustawa z 29 listopada 2000 r. – Prawo atomowe (t.j. Dz.U. z 2026 r. poz. 1).

[20] Rozporządzenie Ministra Rozwoju z 20 maja 2016 r. w sprawie warunków technicznych dozoru technicznego dla urządzeń technicznych lub urządzeń podlegających dozorowi technicznemu w elektrowni jądrowej (Dz.U. z 2016 r. poz. 909).

[21] Rozporządzenie Rady Ministrów z 17 grudnia 2013 r. w sprawie rodzajów urządzeń technicznych podlegających dozorowi technicznemu w elektrowni jądrowej (Dz.U. 2014 poz. 111).

[22] ASME NQA-1 Quality Assurance Requirements for Nuclear Facility Applications.

[23] International Atomic Energy Agency, Safety Classification of Structures, Systems and Components in Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. SSG-30, Vienna, 2014.

[24] Biuletyn Urząd Dozoru Technicznego, Inspektor – Technika i bezpieczeństwo. Energetyka jądrowa, wydanie specjalne, Warszawa, 2025.

[25] PN-EN ISO 19443:2018, Quality management systems – Specific requirements for the application of ISO 9001:2015 by organizations in the supply chain of the nuclear energy sector supplying products and services important to nuclear safety (ITNS).