

O wpływie promieniowania jonizującego na mikrostrukturę i właściwości osłon betonowych – przegląd¹

The influence of ionizing radiation on microstructure and properties of concrete shields – a review¹

1. Wprowadzenie

Oslony z betonu są używane powszechnie w budowie obiektów w elektrowniach atomowych oraz w przypadku innych zastosowań materiałów rozszczepialnych, na przykład do badań materiałowych, zabiegów medycznych, a także gromadzonych na składowiskach odpadów radioaktywnych. Obok zapewnienia funkcji konstrukcyjnych i osłonowych konieczna jest trwałość tych konstrukcji i kontrola starzenia się betonu w warunkach wszystkich oddziaływań zewnętrznych. Ważnym problemem jest wpływ jaki wywiera promieniowanie w okresie eksploatacji na mikrostrukturę i właściwości betonów, zwłaszcza w przypadku wysokich dawek promieniowania, nagromadzonych w ciągu wielu lat. Do najważniejszych rodzajów promieniowania, które stanowią zagrożenie dla personelu i dla otoczenia, należą strumienie neutronów o różnych energiach i promienie gamma (γ).

W związku z tym, że budowa elektrowni atomowych w Polsce została objęta decyzjami rządowymi¹, bardzo duże znaczenie ma rozszerzenie zasobu informacji na temat materiałów i konstrukcji, związanych z tą dziedziną budownictwa, Brandt (2013). Ten zasób informacji powinien z oczywistych powodów wyprzedzać prace projektowe i budowlane. Należy wzbogacić te informacje o współczesny poziom wiedzy w tej dziedzinie, nawet jeżeli budowa elektrowni będzie realizowana w znacznym stopniu przez przedsiębiorstwa zagraniczne, ponieważ prowadzone prace projektowe, a później wykonawcze, powinny podlegać kompetentnej kontroli. Aktualizacja tych informacji jest niezbędna ponieważ od przerwania budowy elektrowni w Żarnowcu we wrześniu 1990 r. nastąpił znaczny postęp na świecie w tej dziedzinie. Co więcej, właściwości osłony betonu, a także zachowanie osłon po napromieniowaniu, w dużej mierze zależą od lokalnych materiałów i technologii, a udział krajowych przedsiębiorstw wykonawczych będzie zapewne poważny.

¹ kontynuacja artykułu A.M. Brandt, CWB 2/2013, 115-132

² Ustawa z dn. 29 czerwca 2011r. o przygotowaniu i realizacji inwestycji w zakresie obiektów energetyki jądrowej oraz obiektów towarzyszących

1. Introduction

Concrete is used universally as a basic material for shields against ionizing radiation in various buildings related to nuclear power structures and for other applications of fission materials, e.g. for material testing, therapeutic treatment installations and radioactive materials deposits. In order to fulfil their structural functions, concrete containment walls should have sufficient durability and the control of the ageing of concrete is necessary in all conditions of their functioning. Apart from climatic actions there are serious problems related to the influence of radiation on concrete microstructure and properties during many years of exploitation, particularly in the case of high doses of irradiation with neutrons and rays gamma (γ).

The decision on construction of nuclear energy plants has been taken in Poland and approved by governmental agencies¹. Therefore, it is necessary to accumulate knowledge at adequate level on materials and structures related to that field of building construction, Brandt (2013). The know-how and ability to apply it purposefully should precede all design and execution works for obvious reasons. The necessary level of competence in that field should be achieved even if the nuclear power plants will be realized mostly by foreign companies, because both design and later execution stages should be thoroughly overseen by local authorities.

A very up-to-date knowledge is required here because of considerable progress achieved in the world once all construction works in Żarnowiec were stopped in September 1990. Furthermore, properties of concrete as a material for protective shields depend considerably upon the local component materials and technology applied and the participation of Polish companies is important in any form of organization of that project.

¹ Second part of the paper by A. M. Brandt, CWB 2/2013, 115-132

² Law of June 29, 2011, on preparation and realization of the nuclear energy reactors and accompanying structures

2. Osłony betonowe

Osłony w postaci ścian i przykryć betonowych są konstrukcjami, które muszą spełniać wymaganie zatrzymania i pochłaniania różnych rodzajów promieniowania w celu niezawodnego osłaniania personelu i otoczenia od promieniowania, pochodzącego z reaktorów jądrowych, a także innych urządzeń i składowisk odpadów materiałów rozszczepialnych. Niezmiernie ważne przy tym jest wymaganie odpowiedniej trwałości osłon w warunkach oddziaływań klimatycznych i promieniowania. Różne procesy starzenia dotyczą bezpośrednio osłon, które w znacznej części wykonywane są z betonu, Brandt i Józwiak-Niedźwiedzka (2012). Funkcje przenoszenia obciążeń eksploatacyjnych i wyjątkowych, np. zderzenie ze spadającym samolotem, działania terrorystyczne, są spełniane przez odpowiednie konstrukcje obudowy zewnętrznej reaktorów, które są często wykonywane z betonu sprężonego.

Pochłanianie strumieni neutronów powoduje wzrost temperatury betonu, która choć w warunkach zwykłej eksploatacji reaktora nie powinna przekraczać $60 \div 80^\circ\text{C}$, to jednak może powodować dodatkowe naprężenia, a także zwiększać możliwość wystąpienia reakcji alkalicznej kruszywa. Zastosowanie specjalnych kruszyw pozwala na znaczną redukcję grubości osłon przy zachowaniu ich właściwości osłonowych; powoduje to zmniejszenie rozmiarów konstrukcji, oszczędność materiałów i miejsca, lepsze chłodzenie naturalne oraz, także zmniejszenie masy materiału o różnym stopniu radioaktywności podczas rozbiórki po zakończeniu eksploatacji reaktora.

Promienie γ tłumione są w materiałach o wysokiej gęstości. Z tego względu osłony są budowane z takich materiałów jak stal, ołów lub beton ze specjalnych kruszyw o wysokiej gęstości.

Hamowanie prędkich neutronów następuje na skutek zderzenia z atomami występującymi w betonie, natomiast atomy wodoru są niezbędne do przechwytywania neutronów pośrednich i powolnych. Stosowane są osłony w postaci basenów z wodą oraz materiały zawierające wodór.

3. Oddziaływanie promieniowania na beton

3.1. Rodzaje oddziaływania

Beton w osłonach, które podczas normalnej eksploatacji reaktora są stale narażone na promieniowanie, a także w osłonach składowisk odpadów radioaktywnych i magazynów izotopów w zakładach medycznych, zachowuje się w sposób szczególny. Dotyczy to zjawisk obserwowanych z różnym nasileniem:

- wzrostu temperatury betonu pod wpływem promieniowania;
- aktywacji betonu; to znaczy, że neutrony powodują powstawanie radioaktywnych izotopów pierwiastków, a beton staje się radioaktywny, ze wszystkimi związanymi z tym konsekwencjami;
- zwiększenia współczynników rozszerzalności liniowej betonów z kruszywami: barytowym, hematytowym i magnetytowym;
- zmian przepuszczalności powietrza i wilgoci przez beton;

2. Concrete shields

The shields in the form of concrete walls and covers are structural elements, which should meet the certain requirements in order to retain and absorb various kinds of radiation and to protect the staff and environment in a reliable way. The radiation may be produced in a nuclear reactor, in other installations or may appear in the facilities for storage of radioactive waste. It is of particular importance that the adequate durability of the shields is ensured in the conditions that are created by radiation and climatic agents. Various ageing processes develop directly in the shields, in their majority built with concrete, Brandt and Józwiak-Niedźwiedzka (2012). Loads due to exploitation as well as accidental loads due to, for example to a plane falling or a terrorist attack, are supported by adequate structural arrangements of external containments, frequently made with prestressed concrete.

Absorption of neutron flux results in increase of temperature of concrete. During normal exploitation of a nuclear reactor temperature should not exceed $67 \div 80^\circ\text{C}$ but it may impose additional state of stress and possibly promote alkali – aggregate reaction. When special aggregates are used the depth of concrete cover may be reduced, therefore not only the mass of material at decommissioning is reduced but also natural cooling is more effective and more space is available.

Radiation γ is absorbed in the materials with high density and that is why the shields of nuclear vessels are built with steel, lead and concrete with special heavy aggregate.

Attenuation of fast neutrons is due to collisions with atoms of the material, but atoms of hydrogen are needed to capture intermediate and slow neutrons. Thus the shields of water basins are used or walls made with materials containing hydrogen.

3. Effects of radiation on concrete

3.1. Kinds of effects

Concrete shields that are exposed to radiation during normal exploitation of nuclear reactors, in the radioactive waste storage facilities and in the magazines of medical isotopes, may behave in a somewhat particular way. There are several effects observed with different intensities:

- Increase of temperature under radiation.
- Activation of concrete, i.e. creation of radioactive isotopes of elements under influence of flux of neutrons and thus concrete becomes radioactive, with all consequences of that fact.
- Dilatation coefficients of the aggregate are increased and this concerns also barites, hematites and magnetites.
- Coefficients of permeability for air and water characteristic for concrete are also modified.
- Internal carbonation of cement based matrix appears under influence of γ radiation and corresponding modification of

- wewnętrznej karbonatacji matrycy cementowej pod wpływem promieniowania γ , i związanych z tym zmian struktury (zmniejszenia porowatości) i właściwości;
- radiolizy wody.

Wymienione zmiany prowadzą do spadku wytrzymałości oraz zmniejszenia modułu sprężystości. Te zmiany, nawet jeśli początkowo niewielkie, mogą mieć po dłuższym czasie poważny wpływ na właściwości osłonne betonu przed promieniowaniem oraz ograniczyć trwałość. Trzeba przy tym określić jaka jest krytyczna dawka promieniowania, która powoduje poważne zmiany tych właściwości betonu. Ważna jest więc ocena czy krytyczna dawka może wystąpić podczas eksploatacji konstrukcji osłonowych. Zmienność właściwości fizycznych zależy w znacznym stopniu od kompozycji betonu, a przewidywanie zajścia tych zmian podczas planowanej eksploatacji jest ważne przy określeniu projektowanego okresu eksploatacji osłon.

Okres eksploatacji energetycznych reaktorów jądrowych był w poprzednim stuleciu przyjmowany w granicach 30÷40 lat. Następnie jednak, po dojściu pierwszych reaktorów do tego wieku, z reguły dopuszczano dalszą eksploatację. Obecnie przyjmowany jest zwykle okres 60 lat, a niekiedy nawet przewiduje się 100 lat użytkowania. Dawki promieniowania powodujące zauważalne spadki wytrzymałości betonu można na podstawie danych zebranych przez Hilsdorfa i in. (1978) określić następująco: w przypadku prędkich neutronów 10^{20} n/cm² oraz $2 \cdot 10^8$ Gy (1J/1kg) w odniesieniu do promieniowania γ . Wartości te są potwierdzane przez nowsze źródła, na przykład przez Fillmore (2010), jednak wobec

microstructure (reduction of porosity) and other properties are observed.

- Interstitial or molecular water is subjected to radiolysis.

All these modifications cause degradation of compressive and tensile strength and decrease of modulus of elasticity. These effects even as they are small at the beginning may after long periods of time influence considerably the efficiency and durability of protection against radiation. Therefore, it becomes necessary to determine what is the critical dose of radiation producing serious modifications of these important properties of concrete and whether such a dose may be absorbed during exploitation of concrete shields. The sensibility of concrete and the degradation of its physical and mechanical properties depend to a large extent upon its composition. These effects in concrete shields should be carefully estimated with respect to the designed life cycle of the facilities.

In the past century the exploitation of nuclear reactors built for electric power was planned for 30-40 years of duration. Later, when the first reactors of early generations reached that age, longer exploitation was accepted as a rule. At present, the exploitation period of 60 years is usually admitted and in some cases 100 years is planned. Irradiation doses that may cause appreciable decrease of strength of concrete may be determined on the basis of data collected by Hilsdorf et al. (1978) in a following way: for fast neutrons 10^{20} n/cm² and $2 \cdot 10^8$ Gy for γ radiation. These values are confirmed by recent sources, e.g. Fillmore (2010). However, because of frequent extensions of exploitation period beyond initial 30 years, the values of conventionally adopted safety limits should

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD MIESZANKI KRUSZYW STOSOWANYCH W BETONACH BADANYCH PRZEZ ALHAJALI I IN. (2009)

COMPONENTS OF AGGREGATE MIX USED IN CONCRETES TESTED BY ALHAJALI ET AL. (2009)

Oznaczenie Mixture	Mieszanka kruszyw / Aggregate mix	Składniki / Composition	Udział / Participation, %
Mix 01	Naturalne kruszywo drobne i grube z brzegów Eufratu Natural fine and coarse aggregate from the sides of Euphrat river	kwarc / quartz kalcyt / calcite ił / clay	50÷60 30÷35 10÷15
Mix 02	Tłuczeń hematytowy Crashed hematite rock	hematyt / hematite kalcyt / calcite portlandyt / portlandite kaolinit / kaolinite	47÷50 20÷28 21÷28 2÷3
Mix 03	Piasek nadmorski z rudami metali; tłuczeń hematytowy Seaside fine aggregates rich of metal ores and hematite coarse aggregate	hematyt / hematite kalcyt, dolomit / calcite, dolomite portlandyt / portlandite kwarc / quartz ił, kaolinit / clay, caolinite	33÷45 10÷40 22÷31 3÷9 2÷5
Mix 04	Tłuczeń dolomitowy Crashed dolomite rocks [CaMg(CO ₃)]	dolomit / dolomite kalcyt / calcite portlandyt / portlandite	85÷90 5÷10 4÷6
Mix 05	Piasek nadmorski z rudami metali; tłuczeń z serpentynu Seaside fine aggregates rich of metal ores and serpentine coarse aggregates	serpentynt/antigorite kalcyt/calcite kwarc/quartz	55÷70 30÷55 0÷5
Mix 06	Tłuczeń z serpentynu Crashed serpentine rock	serpentynt/antigorite kalcyt, dolomit / calcite, dolomite kwarc / quartz	55÷80 12÷40 5÷8

przedłużenia okresu eksploatacji reaktorów ponad 30 lat, wartości tych konwencjonalnie przyjmowanych progów bezpieczeństwa powinny być poddane badaniom i analizie, Kontani i in. (2010). Na dawkę napromieniowania wpływa także konstrukcja reaktora; obecnie budowane są reaktory o różnych konstrukcjach, inne od rozpatrywanych przez Hilsdorfa i in. (1978).

Badania przedstawione przez Alhajali i in. (2009) obejmowały próbki z sześciu różnych betonów, opisanych w Tabelicy 1. Próbki betonów poddano działaniu strumieni neutronów termicznych 10^9 i epitermicznych 10^{10} ($n \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) w okresie porównawczym, otrzymując wartości wskazujące na przekroczenie poziomu uznanego za dopuszczalny, (rys. 1). Wartości sumy $\sum C_i/CL_i$ są obliczane w ten sposób, że sumowanie i obejmuje wszystkie pierwiastki promieniotwórcze od 1 do n , C_i jest radioaktywnością pojedynczego pierwiastka i , a CL_i określa dopuszczalny poziom tego promieniowania. Jeżeli $\sum C_i/CL_i \leq 1$, to materiał odpowiada warunkom bezpieczeństwa. Okazuje się, że w niektórych próbkach wartość tej sumy była większa od 550, a najmniejszą wartość stwierdzono w przypadku betonu oznaczonego Mix04, w którym kruszywem był tłuźczeń dolomitowy. Analizując wyniki badania wszystkich betonów i radioaktywność poszczególnych pierwiastków, autorzy wskazali na niezgodność wyników badań z wymaganiami norm niemieckich DIN 25413 z 1991 r. Wyniki tych badań prowadzą do wniosku, że wszystkie elementy osłonowe, wykonane z badanych betonów będą w okresie rozbiórki reaktora znacznie przekraczały dopuszczalne wartości promieniowania.

Okazuje się przy tym, że trudne jest odróżnienie bezpośredniego wpływu samego promieniowania na właściwości betonu od wpływu podwyższonej temperatury, która była spowodowana promieniowaniem.

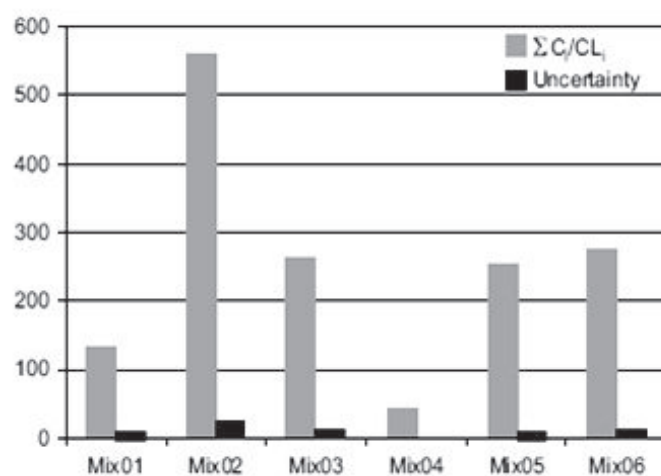
3.2. Wpływ promieniowania na składniki i strukturę betonu

Badania wielu autorów wykazują, że napromieniowanie powoduje znaczny wzrost objętości kruszywa. Elleuch i in. (1972) badali beton o gęstości $2,51 \text{ g/cm}^3$ z kruszywem z serpentynitu i z cementem glinowym w temperaturze ponad 200°C . Próbki z tego betonu pod działaniem strumieni od $1,2 \cdot 10^{19}$ do $1,2 \cdot 10^{20} \text{ n/cm}^2$ prędkich neutronów wykazały odwodnienie zaczynu cementowego i spadek wytrzymałości na ściskanie do 50%. Wyniki badania wpływu cyklicznej zmiany temperatury pokazane są na rys. 2; widać zmiany objętości kruszywa z serpentynitu oraz zaczynu z cementu glinowego, zarówno po nagrzewaniu jak i po napromienieniu. Zmiany objętości zależą od rodzaju kruszywa, a także od jego mikrostruktury. Powiększenie objętości kruszywa decyduje o wzroście objętości betonu, występującym łącznie ze spadkiem wytrzymałości i modułu sprężystości, a także z możliwością powstawania rys. Na rys. 2 widać zmiany objętości próbek z zaczynu z cementu glinowego, zbliżony do skurczu pod wpływem nagrzania. Natomiast wytrzymałość zaczynu zmienia się nieznacznie pod wpływem napromienienia. Uznano, że strumień neutronów w granicach od $2 \cdot 10^{19}$ do 10^{20} n/cm^2 nie powoduje znacznego uszkodzenia betonu ale tylko niewielki spadek wytrzymałości; już

be analysed and submitted to verification, Kontani et al. (2010). In the case of a nuclear reactor, also its type and construction influence the radiation doses imposed on the concrete shields; the nuclear facilities built in last tens of years are different with respect to those considered by Hilsdorf et al. (1978).

In the investigations published by Alhajali et al. (2009) specimens made with six different concretes are described in Table 1. The specimens were submitted to flux of thermal 10^9 and epithermal neutrons 10^{10} ($n \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) in the testing period and the limit level considered as admissible was exceeded as it is shown in Fig. 1. The components of the sum $\sum C_i/CL_i$ are calculated in such a way, that summing up i covers all radioactive elements from 1 up to n , C_i is radioactivity of the element i , and CL_i is the limit level of that radioactivity. When $\sum C_i/CL_i \leq 1$, the safety conditions are satisfied. It turned out that for certain specimens that sum got values even higher than 550; the lowest value was obtained for Mix04, where crashed dolomite was used. The authors indicated that the analysed results from all six mixes and radioactivity of all particular elements led to a conclusion of disagreement with German Standard from DIN 25413 (1991). These results shown among the other that the radioactivity of all parts of the shield walls made with these mixes produce radioactivity at decommissioning overpassing considerably the admissible limit values.

It appears difficult to distinguish direct influence of the radioactivity itself on the concrete properties and the influence of elevated temperature, due to radioactivity.

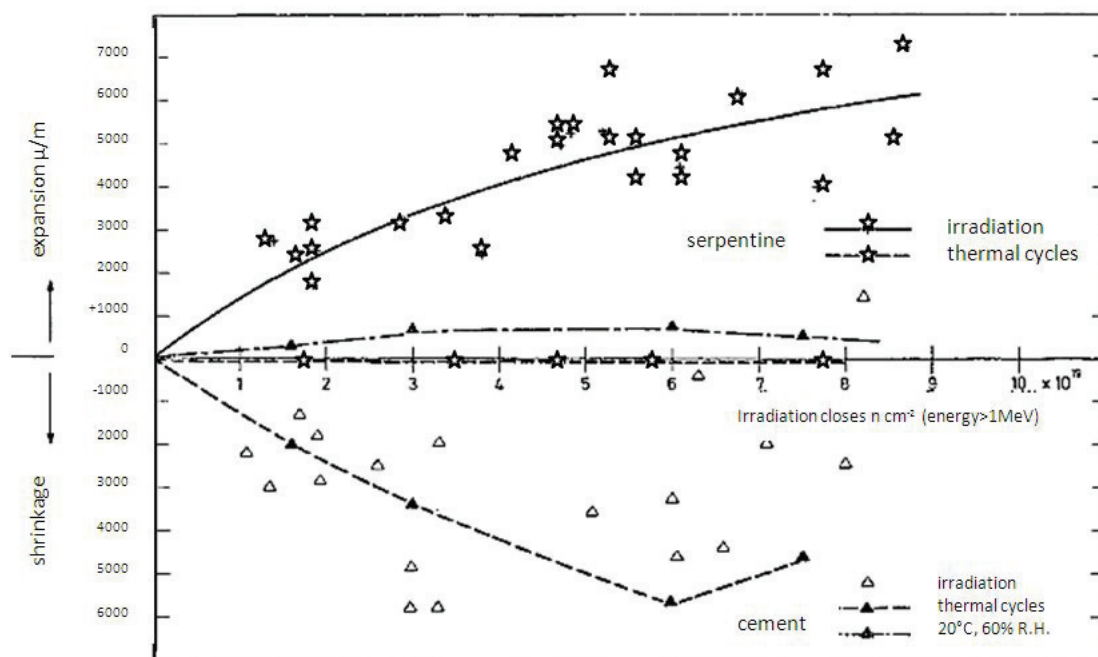


Rys. 1. Wartość stosunku $\sum C_i/CL_i$ charakteryzującego beton oraz przewidywane zakresy niepewności oceny, Alhajali i in. (2009)

Fig. 1. The values of $\sum C_i/CL_i$ of concrete and uncertainty levels, Alhajali et al. (2008)

3.2. Influence of irradiation on components and structure of concrete

Several investigations supplied results indicating that irradiation causes considerable increase of the aggregate volume. Elleuch et al. (1972) tested concrete with density 2.51, with serpentine aggregate and aluminous cement matrix at temperature over 200°C .



Rys. 2. Zmiany objętości kruszywa z serpentynu i zaczynu z cementu glinowego, Elleuch i in. (1971)

Fig. 2. Dimensional changes of serpentine aggregate and aluminous cement paste samples, Elleuch et al. (1971)

po dawce $3 \cdot 10^{19}$ stwierdzono pęcznienie materiału, skurcz zaczynu i mikrozarzysowania.

Badania przeprowadzone znacznie później przez Ochbelagh i in. (2011) wykazały wpływ promieniowania γ na przebieg hydratacji cementu, a także na strukturę zaczynu i zaprawy cementowej. Próbkę poddawano promieniowaniu 0,662 MeV izotopu cezu ^{137}Cs przez okres 7 dni. Autorzy stwierdzili wzrost gęstości zaczynu, ponieważ promieniowanie oddziaływało na powstawanie mikroporów w zaczynie cementowym. Propozycja wyjaśnienia przyczyn tego zjawiska oparta jest na przypuszczeniu, że w zaczynie zachodzi reakcja pucolanowa, która powoduje częściowe wypełnienie porów i zmianę mikrostruktury zaczynu. Dodając do zapraw proszek z ołowiu, uzyskano wzrost gęstości i przy dodaniu 90% masy cementu uzyskano maksimum wytrzymałości na ściskanie, a także poprawę właściwości osłonowych.

Oprócz wpływu na przebieg hydratacji, zauważono wpływ promieniowania na strukturę stwardniałego betonu. W wyniku zderzeń neutronów z atomami materiałów krystalicznych mogą powstać defekty struktury i wzrost kruchości materiału. Woda może ulegać rozkładowi na H_2 i O_2 , a strumień neutronów wywołuje powstanie wtórnego promieniowania γ , co oznacza, że beton staje się promieniotwórczy.

Badania przeprowadzone przez Łowińską-Kluge i Piszora (2008) wykazały, że całkowite zniszczenie nastąpiło w próbkach z cementem portlandzkim po dawce 836 MGy; początki zniszczenia stwierdzono już po następujących dawkach promieniowania:

- w próbkach z cementem portlandzkim po 130 MGy;
- w próbkach z pyłem krzemionkowym i popiołem lotnym po 290 MGy;

The specimens under flux of fast neutron between $1.2 \cdot 10^{19}$ and $1.2 \cdot 10^{20}$ n/cm^2 showed dehydration of cement paste and decrease of compressive strength by 50%. The test results related to the influence of cycles of temperature are shown in Fig. 2 and the modification of volume of the serpentine aggregate and aluminous cement paste are indicated, both after irradiation as well as after heating up. Volume modifications depend upon the aggregate type and its microstructure. The volume increase of aggregate is the source of the expansion of concrete itself and is accompanied by decrease of strength and elastic modulus and by possibility of crack opening. Shrinkage of aluminous paste is shown in Fig. 2 and is close to shrinkage caused by heating. It is admitted that neutron flux of intensity around $2 \cdot 10^{19}$ to 10^{20} n/cm^2 produces degradation of concrete, but the strength of the paste is only slightly decreased by irradiation; after dose $3 \cdot 10^{19}$ n/cm^2 expansion of concrete, shrinkage of paste and microcracking were observed.

Investigations conducted much later by Ochbelagh et al. (2011) showed that γ irradiation influenced hydration of cement and structure of both cement paste and mortar. The specimens were subjected to irradiation of 0.662 MeV from ^{137}Cs during 7 days. Increase of density was observed because the radiation influenced creation of micropores in cement paste during solidification. Explanation of these effects was based on assumption that alkali reaction developed in the pores and resulted in their partial filling and modification of the microstructure by elimination of micropores. When lead powder was added to the mortars their density increased and for 90% of cement mass maximum compressive strength and improvement of protection against radiation was obtained.

The influence of radiation not only on cement hydration but also on final concrete structure was observed. Because of collisions

Tablica 2 / Table 2

DAWKI I OKRESY PROMIENIOWANIA, KTÓRE MOGĄ SPOWODOWAĆ DEGRADACJĘ OSŁON BETONOWYCH, ICHIKAWA, KIMURA (2007)
DOSES AND PERIODS OF RADIATION WHICH MAY DEGRADE THE CONCRETE SHIELDS, ICHIKAWA, KIMURA (2007)

Kruszywo /Aggregate	Krytyczne dawka i okres promieniowania β lub γ Critical dose and period of radiation β or γ		Krytyczne dawka i okres promieniowania neutronowego Critical dose and period of neutron radiation	
Skaleniowe* / Plagioclase*	$1 \cdot 10^8$ Gy	5 lat/years	$1 \cdot 10^{16}$ n/cm ²	4 dni/days
Kwarc / Quartz	$1 \cdot 10^{12}$ Gy	50.000 lat/years	$1 \cdot 10^{20}$ n/cm ²	100 lat/years

* skałek reprezentowany głównie przez plagioklaz

– w próbkach z granulowanym żużlem 466 MGy;

Ważne wyniki uzyskali Ichikawa i Kimura (2007) określając skutki reakcji alkalicznej kruszywa, wywołanej niewielkimi dawkami promieniowania, takimi jak fluencja 10^6 Gy i 10^{16} n/cm² przy użyciu kruszywa zawierającego plagioklaz (andezyt). Porównawcze badania wykonane przy użyciu tego kruszywa bez wpływu promieniowania nie wykazały reakcji alkalicznej. Mimo to stwierdzono, że obecność reakcji ASR nie wpłynęła w badanym przypadku na niezawodność konstrukcji z betonu w okresie przewidywanej eksploatacji. Clifton (1991) wykazał, że jest mało prawdopodobne, aby z powodu reakcji alkalicznej nastąpiło uszkodzenie konstrukcji betonowej reaktora. W Tabeli 2 zestawiono dane doświadczalne oraz obliczeniowe dotyczące uszkodzeń betonu na skutek reakcji alkalicznej w przypadku dwóch rodzajów kruszywa.

Hilsdorf i in. (1978) stwierdzili, że krytyczne wartości strumienia neutronów i promieniowania gamma to odpowiednio 10^{21} n/cm² oraz 10^8 Gy, powodujące zarysowania w betonie. Podobnie Morinaga (wg. Ichikawa i Kimura, 2007) uzyskał wyniki wskazujące, że prędkie neutrony w dawce $5 \cdot 10^{19}$ n/cm² powodują pęcznienie ziaren kruszywa i skurcz zaczynu cementowego, wzrost kruchości, mikrozarzysowanie, odwodnienie zaczynu cementowego i spadek wytrzymałości na zginanie. Są to dawki o wiele niższe od spotykanych w obudowach reaktorów. W ocenach badaczy występują jednak liczne rozbieżności co do rzeczywistych oddziaływań promieniowania na beton.

Uszkodzenia betonu powstają także z powodów innych niż promieniowanie. Według Picketta (2000) w wodzie w basenie magazynowania prętów uranu znaleziono duże ilości wapna i magnezu, które zostały wypłukane z betonu ścian osłonowych. Widoczne uszkodzenia to rysy spowodowane skurczem betonu i penetracją wody przez beton.

Wiele źródeł wskazuje na znaczny wpływ fluencji neutronów po przekroczeniu wartości 10^{19} n/cm², zależnie od rodzaju kruszywa, na wzrost objętości betonu, rys. 3. Kruszywo wykazuje bowiem wzrost odkształceń, co ma wpływ na wytrzymałość na rozciąganie po napromieniowaniu, a charakterystyczne wartości stosunku wytrzymałości naciśnięcia i rozciągania próbek porównawczych zestawiono w Tabeli 3. Okazuje się, że wpływ rodzaju kruszywa na wzrost objętości betonu po napromieniowaniu powoduje spadek wytrzymałości. Stwierdzono przy tym, że próbki porównywanych betonów poddane tylko wpływom termicznych bez promieniowania nie wykazywały takiego wzrostu objętości. Zauważono także, że

between neutrons and atoms of crystalline materials certain defects of their structure and increase fragility may appear. Water may be decomposed into H₂ and O₂; under the flux of neutrons secondary γ radiation appears which means that concrete becomes radioactive.

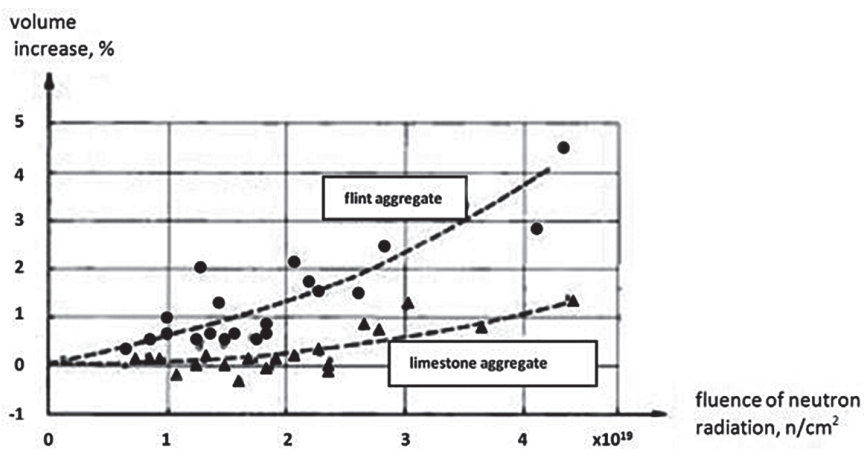
Investigations published by Łowińska-Kluge and Piszora (2008) have shown that complete degradation of paste specimens with Portland cement occurred after the dose equal to 836 MGy; the origins of destruction were observed after following doses of radiation:

- in the specimens with Portland cement after 130 MGy;
- in the specimens with silica fume and fly ash after 290 MGy;
- in the specimens with granulated slag 466 MGy.

Interesting results were obtained by Ichikawa and Kimura (2007) who have shown the results of alkali-silica reaction (ASR) due to moderate doses of radiation of the order of 10^6 rad and 10^{16} n/cm² when plagioclase-rich aggregate, such as andesite, was used for concrete, even if this concrete with aggregate was initially inert to ASR. In Table 2 critical doses are shown with respect of damage of concretes with two kinds of aggregate. Nevertheless, it was concluded that the shields made with andesite might be considered as safe during the planned exploitation and taking into account the periods of exposure of concrete shields on high-level radiation. Clifton (1991) proved also that the probability of structural damages due to ASR was very low in heavy reinforced concrete shields. In Table 2 doses and periods of radiation which may degrade the concrete in the shields are presented.

Hilsdorf et al. concluded already in 1978 that critical values of neutron flux and γ irradiation were 10^{21} n/cm² and 10^8 Gy, respectively, i.e. effecting in cracking of concrete. Thirty years later Morinaga (after Ichikawa i Kimura, 2007) obtained results indicating that after doses of fast neutrons equal to $5 \cdot 10^{19}$ n/cm² swelling of aggregate grains, shrinkage and dehydration of cement paste are accompanied by increased fragility, microcracking, and degradation of flexural strength. Such doses are lower than occurred in the shields on nuclear reactors, but estimations of different researchers contain multiple disagreements as to the real influence of irradiation of concrete.

Concrete may be damaged also by other factors and not only by irradiation. Pickett's investigation (2000) concerned uranium bars that were stored in a basin with water and an appreciable amount of calcium and magnesium were dissolved from concrete. It was discovered that water penetrated across protective coating, which



Rys. 3. Wpływ napromieniowania prędkimi neutronami na wzrost objętości betonów z dwóch różnych kruszyw, Hilsdorf i in. (1978)

Fig. 3. Volume change of concrete specimens made with two kinds of aggregate and exposed to fast neutrons, Hilsdorf et al. (1978)

Tablica 3 / Table 3

WPŁYW NEUTRONÓW NA WYTRZYMAŁOŚĆ BETONU NA ROZCIĄGANIE, HILSDORF I IN. (1978)

INFLUENCE OF NEUTRONS ON CONCRETE TENSILE STRENGTH, HILSDORF ET AL. (1978)

Rodzaj kruszywa Aggregate	Fluencja neutronów, Neutron fluence, n/cm ²	f_{ru}/f_{ru0}
krzemień flint	2 · 10 ¹⁹	0,44
	3 · 10 ¹⁹	0,33
	4 · 10 ¹⁹	0,33
wapień limestone	2 · 10 ¹⁹	0,69
	3 · 10 ¹⁹	0,48
	4 · 10 ¹⁹	0,43

fluencja neutronów poniżej 10¹⁹ n/cm² nie powodowała wzrostu objętości próbek.

3.3. Wpływ wzrostu temperatury na właściwości betonu w osłonach

Wzrost temperatury w konstrukcjach obudowy reaktora i w osłonach może być spowodowany zewnętrznym nagraniem od reaktora lub promieniowaniem neutronowym i promieniami γ . Temperatura w obudowie reaktora może dochodzić do 500°C, ale w osłonach betonowych wg zaleceń American Concrete Institute jest ograniczona do 65°C lub do 90°C przez organizacje międzynarodowe w tej dziedzinie. Działanie strumienia neutronów może powodować wzrost temperatury w ścianach osłonowych nawet do 250°C, a już wzrost powyżej 100°C powoduje zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie o 30÷40% i w większym stopniu na rozciąganie. Jeszcze większy wpływ mają cykliczne zmiany temperatury, np. między 20 a 150°C, Bertero i Polivka (1972), co może wydarzać się przy zakłóceniach działania systemów chłodzenia.

Rozdzielenie bezpośredniego wpływu promieniowania od wpływu wzrostu temperatury nie jest łatwe, ponieważ występują łącznie; zwrócił na to uwagę Acevedo (2010) w opublikowanym przeglądzie

covered concrete walls. Apparent damages in the form of cracks were caused by shrinkage and water leakage.

Several authors have shown considerable effect of the neutron fluence after a limit of 10¹⁹ n/cm² on the increase of concrete volume, in relation to kind of aggregate, Fig. 3. Increased deformability of aggregate is the source of higher deformations and consequently of lower tensile strength of irradiated concrete. Characteristic values of strength after irradiation as compared with reference specimens are shown in Table 3. It appears that the type of aggregate may have influence on volume increase of concrete and decrease of its strength. It was observed also that in the specimens subjected to thermal actions only did not increased their volume. In particular, neutron fluence below 10¹⁹ n/cm² did not influence the volume of these specimens.

3.3. Influence of temperature increase on the properties of concrete shields

Increase of temperature in the reactor shields may be caused by external heating from the reactor itself or may be caused by neutron and γ radiation. Temperature in the shields may reach even 500°C but according to the recommendations of American Concrete Institute, temperature in concrete shields should be limited to 65°C while other specialized international organization allows up to 90°C. The neutron flux may increase temperature even up to 250°C, but if it is above 100°C the compressive strength is reduced by 30÷40%; and the tensile strength is reduced even more. Cyclic variations of temperature, e.g. between 20 and 150°C are more harmful according to Bertero and Polivka (1972); such situations may appear in certain abnormal functioning of cooling systems.

It is difficult to distinguish between the influence of elevated temperature and that of the irradiation when these two appear simultaneously, as it was stressed by Acevedo (2010) in his published revue of experimental investigations. It may be proposed after Granata and Montagnini (1972) that a dose of neutron of approximately 10⁹ n/cm² at temperature of 130°C had only negligible influence on both ordinary and barite concretes; γ irradiation was equal to 10⁹ Gy. However, when temperature raised up to 280°C and neutron flux was equal to 10²⁰ n/cm² concrete was seriously damaged.

Divya Rani and Santhanam (2012) published extensive investigations of the temperature increase in the vaults made with ordinary concrete that covered nuclear reactors and were subjected to neutron flux. Temperature of concrete was between 65 and 90°C, also with cyclic variations. Serious modifications in concrete mechanical properties were observed:

- increase of compressive strength up to over 40%;
- increase of tensile strength approximately 30%;

badania. Z badań Granata i Montagnini (1972) wynika, że fluencja neutronów rzędu 10^9 n/cm² w temperaturze 130°C miała znikomy wpływ na zwykły beton i na beton z kruszywem barytowym; dawka promieniowania γ wynosiła 10^9 Gy. Jednakże przy wzroście temperatury do 280°C i działaniu strumienia neutronów dochodzącego do 10^{20} n/cm² beton został poważnie uszkodzony.

Szczegółowe badania wzrostu temperatury w sklepieniach ze zwykłych betonów przekrywających reaktory i poddanych działaniu strumieni neutronów przeprowadzili Divya Rani i Santhanam (2012). Badano betony w temperaturze 65-90°C, a także w przypadku cyklicznych zmian temperatury. Stwierdzono poważne zmiany właściwości fizycznych i mechanicznych, mianowicie:

- wzrost wytrzymałości na ściskanie, dochodzący nawet do 40%;
- wzrost wytrzymałości na zginanie, wynoszący ok. 30%;
- spadek wytrzymałości na zginanie w przypadku cyklicznych zmian temperatury, np. między 30 a 90°C;
- spadek modułu sprężystości o około 11÷13%;
- wzrost przyczepności do stalowego zbrojenia o ponad 20%.

Okazało się przy tym, że podwyższenie temperatury podczas normalnej eksploatacji reaktora do 75°C powoduje istotny wzrost współczynnika rozszerzalności termicznej betonu.

Badania przeprowadzone przez Sakr i El-Hakim (2005) obejmowały porównanie właściwości osłonowych betonów zwykłego, barytowego i ilmenitowego po ogrzaniu do temperatury 950°C. Takie warunki mogą powstać w sytuacji awaryjnej. Okazało się, że beton z kruszywem ilmenitowym zachował w największym stopniu zdolność tłumienia promieniowania γ .

Przeprowadzone pomiary i obliczenia przez El-Sayed Abdo i Amin (2001) wskazują na możliwość niewielkiego tylko wzrostu temperatury w osłonie biologicznej ze zwykłego betonu pod wpływem przechwytywanych neutronów termicznych, a także wtórnego promieniowania γ . Wskazuje to na niewielki i malejący w głąb osłony (rys. 4) wpływ neutronów termicznych na temperaturę betonu; jest to pomijalne ze względu na wpływ na właściwości betonu.

4. Wpływ promieniowania na właściwości betonu

4.1. Spadek wytrzymałości betonu

Liczne prowadzone badania dostarczają wyników, które są często trudne do porównywania i ogólnego wnioskowania ze względu na rozmaite zastosowane warunki badań (wymiary próbek, składniki i skład betonu, cykle nagrzewania i intensywność chłodzenia). Okazuje się, że już przy dawce neutronów 10^{19} n/cm² w niektórych badaniach stwierdzono spadek wytrzymałości, przypisywany napromienianiu, chociaż wpływ wzrostu temperatury był widoczny.

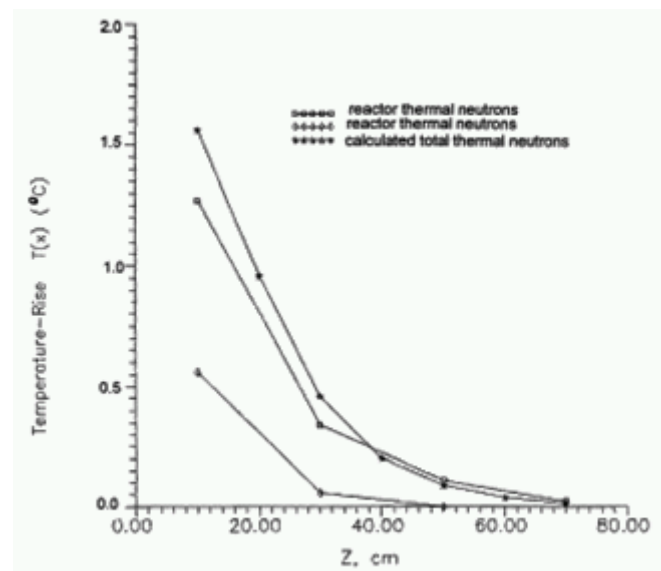
Badania wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie w ubiegłym stuleciu zebrali Hilsdorf i in. (1978). Wyniki przedstawione na rys. 5 mogą być silnie zakłócone przez okoliczność, że wszystkie próbki badane przez Sommersa (1969) były przechowywane w deminera-

- decrease of flexural strength when temperature varied, e.g. in cycles 30 and 90°C;
- decrease of elasticity modulus by approximately 11÷13%;
- increase of bond between cement matrix and reinforcement by over 20%.

Moreover, it appeared that the temperature raise up to 75°C during normal exploitation of the nuclear reactor resulted in an appreciable increase of coefficient of thermal extension of concrete.

The investigations conducted by Sakr and El-Hakim (2005) covered the comparison of shielding properties between ordinary, barite and ilmenite concretes after heating them up to 950°C. Such conditions may appear only at emergency situations. They concluded that concrete with ilmenite aggregate maintained its shielding properties to attenuate γ radiation at the highest level.

Measurements and calculations carried on by El-Sayed Abdo and Amin (2001) allowed to conclude relatively low increase of temperature in concrete shield due to captured thermal neutrons and secondary γ radiation. The influence of thermal neutrons on concrete is low and decreasing with the distance from internal face (Fig. 4); this is negligible as it concerns effects in concrete properties



Rys. 4. Przyrost temperatury w zwykłym betonie osłony w funkcji odległości od wewnętrznej powierzchni pod wpływem promieniowania γ spowodowanego zatrzymywaniem neutronów termicznych (pomiar i obliczenie) oraz od neutronów termicznych. El-Sayed Abdo i Amin (2000)

Fig. 4. Temperature rise distribution in ordinary concrete shield (as a function of distance from internal face) because of gamma-rays due to capture of thermal neutrons (measured and calculated) and due to reactor thermal neutrons. El-Sayed Abdo and Amin (2000)

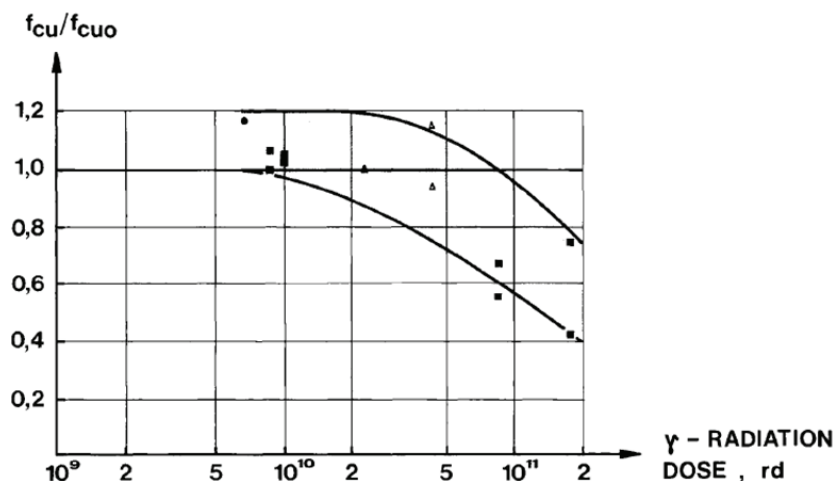
4. Influence of radiation on the concrete properties

4.1. Decrease of concrete strength

Frequently published investigations supply the results that are often difficult for any comparison and general conclusions because of

lizowanej wodzie, stąd większość wyników dotyczy także wpływu wody, powodującego spadek wytrzymałości.

Sopko i in. (2004) stwierdzili obniżenie wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie betonu z naturalnego kruszywa w wyniku jonizującego działania promieni γ . Przypisali to działaniu radiolizy wody, które w betonie polega na zmianie składu fazowego zaczynu cementowego i zmniejszeniu stopnia hydratacji cementu. Zmiany wytrzymałości są proporcjonalne do ilości pochłoniętego promieniowania i sięgają ok. 10 % pierwotnych wartości, przy znacznych rozrzutach.



Rys. 5. Wpływ napromieniowania gamma na wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie, według różnych badaczy, Hilsdorf i in. (1978), wg. • Alexander (1963); ■ Sommers (1969); ▲ Gray (1972)

Fig. 5. Compressive and tensile strength of concrete exposed to γ radiation f_{cu} related to strength of untreated concrete f_{cu0} , Hilsdorf et al. (1978); after • Alexander (1963); • Sommers (1969); ▲ Gray (1972)

Wyniki badania wytrzymałości próbek betonowych o rozmiarach 0,4x0,1x0,1 m opublikowali Vodak i in. (2004). Próbki po dojrzewaniu przez 90 dni były poddawane promieniowaniu γ przez kolejne 83 dni, przyjmując ok. $5 \cdot 10^5$ Gy. Przykład spadku wytrzymałości na ściskanie pokazany jest na rys. 6; podobne wyniki uzyskano badając wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu i na rozłupywanie. Widać spadek wytrzymałości wraz z ilością pochłoniętego promieniowania γ . Skuteczność osłon w takich warunkach nie jest zagrożona, ponieważ w przewidzianym okresie eksploatacji betonowe osłony nie przyjmują takich dawek napromieniowania, a niektórzy autorzy próg wystąpienia znacznych zmian wytrzymałości określają na 10^8 Gy. Zmiany porowatości pokazane są na rys. 7; podobne zmiany zaobserwowano także w różnych grupach rozmiarów porów.

Autorzy tych badań wskazali również na znaczne zmiany struktury porów badanych betonów po napromieniowaniu. Analiza dyfrakcyjna wykazała obecność kryształów kalcytu, stąd wnioski o procesie wewnętrznej karbonatyzacji pod wpływem promieniowania.

W późniejszej publikacji Vodak i in. (2011) również przedstawili wyniki badań w postaci zmian rozkładu i wielkości porów w be-

different test conditions (dimensions of specimens, components of concrete and their proportions, cycles of heating and intensity of cooling). It appears that with the dose of neutrons of 10^{19} n/cm² in certain investigations the decrease of strength was attributed to irradiation, while influence of apparent temperature increase might be also the reason.

Test results related to compressive and tensile strength were collected last century by Hilsdorf et al. (1978). The results presented in Fig. 5 may be strongly affected by the fact that all specimens tested by Sommers (1969) were stored in demineralised water, therefore majority of results were under the negative influence of water.

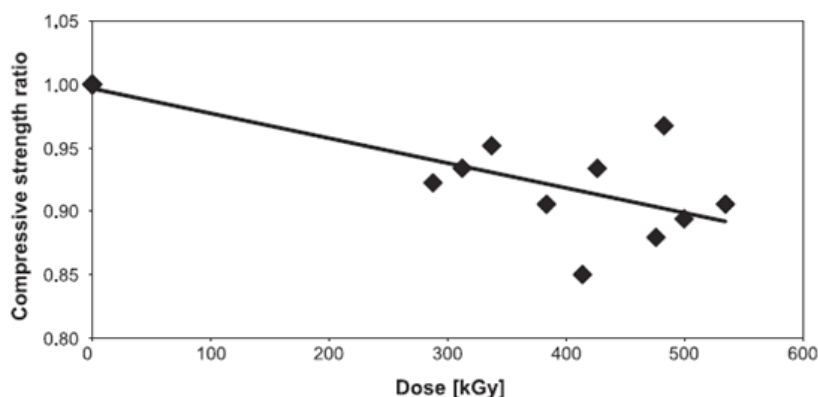
Sopko et al. (2004) observed that compressive and tensile strength of concrete with natural aggregate decreased under influence of ionization by γ radiation. According to their opinion it was the effect of water radiolysis that modified the phase composition of cement paste and lower degree of cement hydration. The decrease of strength was proportional to the radiation dose and reached approximately 10% of initial values, with high scatter of results.

Test results obtained from concrete specimens 0.4x0.1x0.1 m were published by Vodak et al. (2004). The specimens after 90 days of ageing were subjected to γ radiation during 83 days with total dose of approximately $5 \cdot 10^5$ Gy. An example of decrease of strength is presented in Fig. 6; similar results were obtained after tensile and splitting tests. The decrease of strength with the amount of γ radiation absorbed is visible, however the efficiency of protection is not endangered because in the scheduled exploitation the concrete shields do not absorb such irradiation;

certain authors propose higher value of radiation equal to 10^8 Gy as a limit to avoid serious modification of concrete strength. Decrease of porosity is shown in Fig. 7, similar modifications were observed for different gradations of pores also.

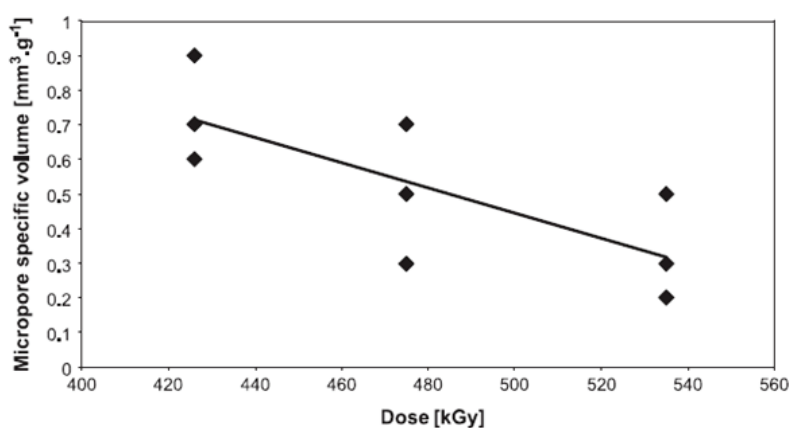
The results of these investigations indicated also on considerable modifications of pore systems after irradiation. After diffraction analysis crystals of calcite were indicated, therefore internal carbonation due to radiation may be diagnosed.

In their paper published later Vodak et al. (2011) the results related to modifications of distribution and dimensions of pores were also presented. The development of portlandite and calcite was confirmed and supplementary carbonation that developed in parallel to natural one was observed. While natural carbonation produced due to diffusion of CO₂ in concrete was observed mostly in external layers, carbonation caused by γ radiation developed in the entire volume of concrete. Together with the dose of absorbed radiation by concrete specimens from 0 to 1.5 MGy, the reduction of the specimens' mass due to water hydrolysis, decreased average pore dimension in cement matrix and increased hardness as well as microcrack opening were observed. These effects were cha-



Rys. 6. Zależność wytrzymałości na ściskanie betonu od pochłoniętego promieniowania γ . Wytrzymałość betonu porównawczego wynosiła 69,4 MPa przy dawce 0, według Vodak i in. (2005)

Fig. 6. Dependence of compressive strength ratio on dose of γ radiation. Value of standard (dose zero) is 69.4 MPa, after Vodak et al. (2005)



Rys. 7. Zależność porowatości betonu od pochłoniętego promieniowania γ . Porowatość betonu porównawczego wynosiła 12% przy dawce 0, według Vodak i in. (2005)

Fig. 7. Dependence of porosity on dose of γ radiation. Value of standard (dose zero) is 12%, after Vodak et al. (2005)

tonie i potwierdzili powstawanie portlandytu i kalcytu. Stwierdzili zjawisko dodatkowej karbonatyzacji, która rozwijała się równolegle z naturalną karbonatyzacją. O ile naturalna karbonatyzacja jest związana z dyfuzją CO_2 w betonie i występuje przede wszystkim w warstwie zewnętrznej, to karbonatyzacja spowodowana promieniowaniem γ zachodzi w całej objętości. Wraz ze wzrostem ilości pochłoniętego promieniowania przez próbki betonu od 0 do 1,5 MGy zaobserwowano zmniejszenie masy próbek na skutek hydrolizy wody, zmniejszenie średniej wielkości porów w matrycy cementowej oraz wzrost twardości i pojawienie się mikrorys. Były to zjawiska o dużych rozrzutach i niewielkich wartościach, co utrudniało bezpośrednie wykorzystanie wyników i raczej wskazało na konieczność dalszych badań.

Okazuje się więc, że promieniowanie γ wywołuje różne procesy w betonie, uzyskane także w innych badaniach, m.in. radiolizę wody i tworzenie się kalcytu w porach, co powoduje spadek wytrzymałości.

racterized by high scatter and relatively low values, and that is why their direct use and conclusions were difficult; rather the necessity of further investigations was stressed.

It appears after these test results that due to γ radiation various processes are initiated in concrete microstructure and also observed in other investigations, including water radiolysis and creation of calcite in the pores, and as a result concrete strength is decreasing. Bouniol and Aspart (1998) focused their attention on water hydrolysis indicating that because of γ irradiation, the hydrogen peroxide may react with portlandite thus modifying the phase composition of cement matrix. Peroxide is created and is quickly decomposed, then carbonation with CO_2 is initiated.

Pomaro et al. (2011) supported the thesis that it was necessary to take into account the damages in the microstructure of concrete shields produced by fast and thermal neutrons after exceeding a particular threshold of the fluence value. The total destruction is a combined influence of radiation and thermochemical processes, which are independent unless simultaneous. It was admitted that the fluence equal to $10^{12} \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sec})$ of fast and thermal neutrons was a limit value for biological protection after 50 years of exploitation and it was based on approximate theory of diffusion and separate consideration of both kinds of neutrons. Calculations were made for combined thermo-chemical-mechanical actions assuming the decrease of modulus of elasticity to 50% of its initial value at the most exposed surface of a wall with thickness 3.5 m in which the edge of damaged portion was defined. The authors' conclusion was that concretes with special aggregate (e.g. magnetite, limonite against fast neutrons and also serpentine against thermal neutrons) should be applied, though shielding properties were considered as less decaying than elastic modulus.

The effect of decrease of concrete strength due to irradiation was observed already in 1978. In Figs. 8 and 9, the values of compressive strength f_{cu} of specimens subjected to irradiation are presented and compared with specimens that were neither irradiated nor heated without radiation. These test results were used for calibration of calculations published by Pomaro et al. (2011).

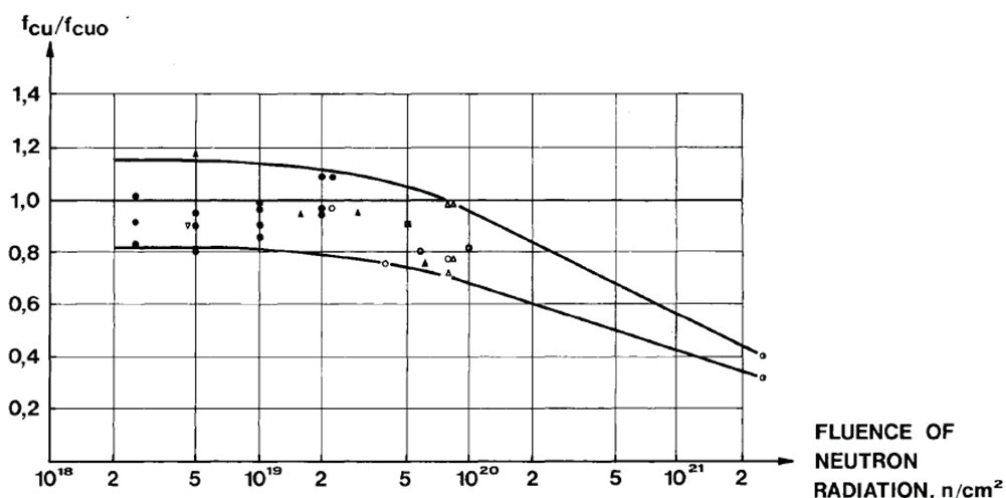
Interesting experiments were carried on in ORNL³, (Blosser et al. 1959). Relations between concrete compressive strength after radiation during 4 and 12 years were determined on cores taken out of the shield walls and situated at the same distance from the exposed surface, Fig. 10. The influence of the distance from the reactor core is clearly visible and concrete in the closest specimens

³ Oak Ridge National Laboratory (USA)

Na radiolizę wody zwrócili uwagę Bouniol i Aspart (1998) wskazując, że powstająca na skutek działania promieniowania γ woda utleniona może reagować z portlandytem zmieniając skład fazowy zaczynu. Tworzy się nadtlenek wapnia, który podlega szybkiemu rozkładowi, powodując karbonatyzację w obecności CO_2 .

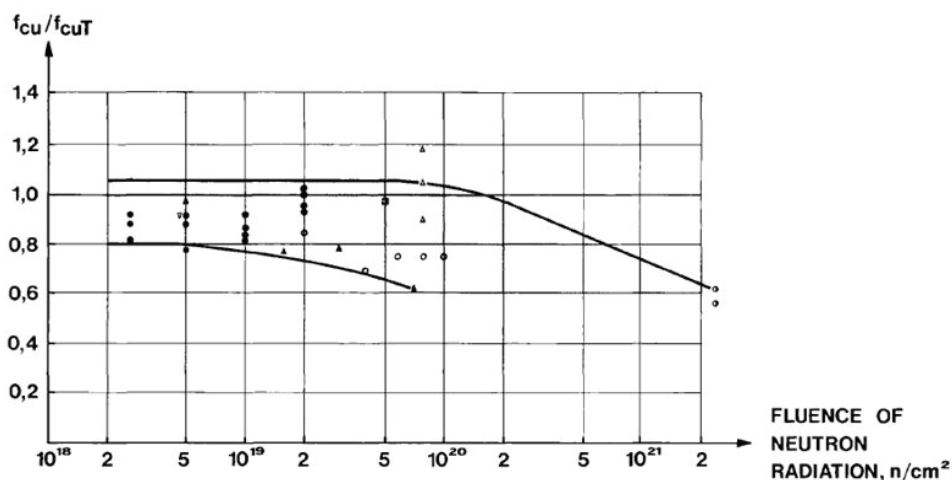
Pomaro i in. (2011) wnioskowali konieczność uwzględniania uszkodzeń w strukturze betonowych osłon pod wpływem prędkich i termicznych neutronów po przekroczeniu szczególnej wartości progowej fluencji. Całkowite uszkodzenie jest wynikiem łącznego działania promieniowania i zjawisk termochemicznych, przy czym są one niezależne, jeżeli nie występują równocześnie. Przyjęto fluencję równą 10^{12} n/(cm²·sec) neutronów prędkich i termicznych jako wartość poniżej ochrony biologicznej, występującej po 50-letniej eksploatacji, na podstawie przybliżonej teorii dyfuzji i oddzielnych ujęć w przypadku obu rodzajów neutronów. Przeprowadzono obliczenia połączonych oddziaływań termochemiczno-mechanicznych przy gradiencie temperatury dochodzącym do 50°C. Obliczenia te wskazały na spadek do 50% modułu sprężystości betonów zwykłych na najbardziej narażonej powierzchni osłony o grubości 3,5 m, w której badano zakres uszkodzenia. We wniosku autorzy sugerują zastosowanie betonów ze specjalnym kruszywem (np. magnetytowym, i limonitowym w przypadku prędkich neutronów i serpentynitowym w osłonie przed termicznymi neutronami), choć wytrzymałość ulega mniejszej redukcji niż właściwości osłonowe.

Na zjawisko spadku wytrzymałości na ściskanie betonu w wyniku napromieniowania zwrócono uwagę już w 1978 roku. Na rys. 8 i 9 pokazana jest wytrzymałość na ściskanie f_{cu} próbek poddanych promieniowaniu w stosunku do wartości f_{cu0} próbek, które nie były napromieniowane ani podgrzewane, a także do próbek odpowiednio podgrzewanych bez promieniowania. Wyniki tych badań posłużyły do kalibracji obliczeń Pomaro i in. (2011).



Rys. 8. Spadek wytrzymałości na ściskanie f_{cu} w stosunku do próbek porównawczych f_{cu0} , Hilsdorf i in. (1978), wg • Alexander (1963) i ▲ Price (1957) powolne neutrony; ◦ Elleuch i in. (1971); Δ Houben (1969); ◐ Batten (1960); ◑ Dubrovskij (1966)

Fig. 8. Compressive strength of concrete exposed to neutron radiation f_{cu} related to strength of untreated concrete f_{cu0} , Hilsdorf et al. (1978) after • Alexander (1963) and ▲ Price (1957) slow neutrons; ◦ Elleuch i in. (1971); Δ Houben (1969); ◐ Batten (1960); ◑ Dubrovskij (1966)



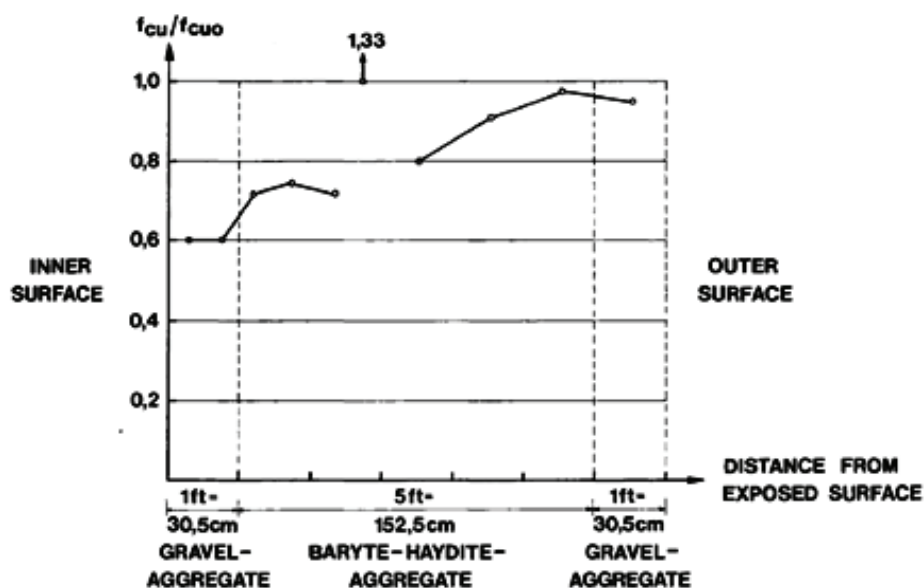
Rys. 9. Spadek wytrzymałości na ściskanie jak na rys.7, ale w stosunku do próbek porównawczych, poddanych nagrzewaniu bez promieniowania, Hilsdorf i in. (1978); wg • Alexander (1963) i ▲ Price (1957) powolne neutrony; ◦ Elleuch i in. (1971); Δ Houben (1969); ◐ Batten (1960); ◑ Dubrovskij (1966)

Fig. 9. Compressive strength of concrete exposed to neutron radiation f_{cu} related to strength of strength of temperature exposed concrete f_{cuT} , Hilsdorf et al. (1978) after • Alexander (1963) and ▲ Price (1957) slow neutrons; ◦ Elleuch i in. (1971); Δ Houben (1969); ◐ Batten (1960); ◑ Dubrovskij (1966)

lost approximately 40% of its strength. The radiation doses after 8 years of exposure were following:

- thermal (slow) and epithermal neutrons $1.9 \cdot 10^{19}$ n/cm² (fluency)
- fast neutrons $2.5 \cdot 10^7$ rad
- γ radiation $2.5 \cdot 10^{19}$ rad

Additionally it may be observed that temperature was 20 and 40°C, on external and internal surfaces of the shield, therefore the gradient of temperature might have also some influence on the strength decay. From Figs. 11 and 12 it may be concluded that it was not only the influence of temperature but mainly radiation influ-



Rys. 10. Spadek wytrzymałości na ściskanie próbek z różnej odległości od rdzenia reaktora, Blosser i in. (1959)

Fig. 10. Distribution of concrete compressive strength over thickness of biological shield of ORNL-graphite reactor, Blosser et al. (1959)

Interesujące doświadczenie przeprowadzono w ORNL³, (Blosser i in. 1959). Stosunek wytrzymałości betonu na ściskanie po 4. i 12. latach napromienienia określono na rdzeniach, pobranych w różnej odległości od powierzchni, wystawionej na promieniowanie, rys. 10. Widać wyraźny wpływ odległości od rdzenia reaktora, przy czym beton najbliższy rdzenia utracił ok. 40% wytrzymałości. W okresie 8. lat tego badania dawki promieniowania były następujące:

- termiczne (powolne) i epitermiczne neutrony $1,9 \cdot 10^{19}$ n/cm² to fluencja,
- prędkie neutrony $2,5 \cdot 10^5$ Gy,
- promieniowanie gamma $2,5 \cdot 10^{17}$ Gy.

Dodatkowo warto zauważyć, że temperatura wynosiła 20°C i 40°C, odpowiednio na zewnętrznej i wewnętrznej powierzchni, stąd gradient temperatury mógł mieć także wpływ na wytrzymałość. Z zestawienia wykresów na rys. 11 i 12 wynika, że nie tylko wpływ temperatury oddziaływał na wytrzymałość, ale przede wszystkim decydowało promieniowanie; stwierdzono znaczne rozrzuty otrzymanych wartości.

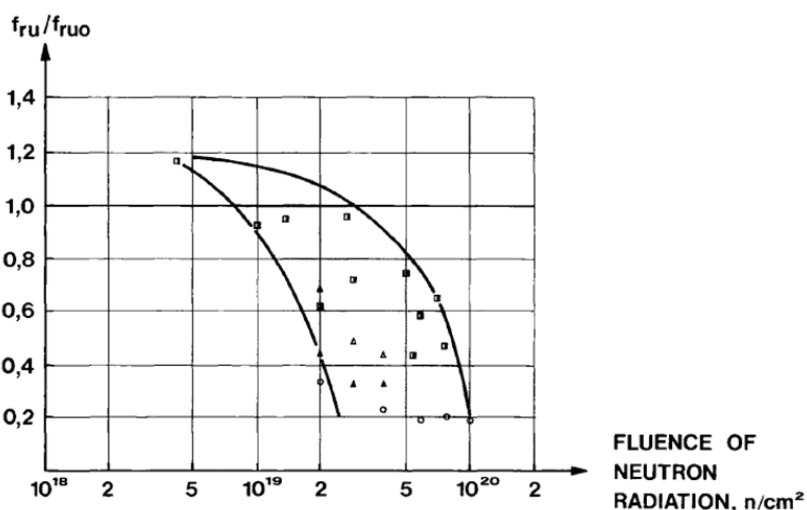
Wpływ promieniowania gamma na właściwości betonu był rozpatrywany przez niewielu badaczy, jednak konieczne jest to w przypadku obudowy składów odpadów radioaktywnych. Osłony są w tym przypadku narażone na stałe i długotrwałe promieniowanie. Interesujące badania tego zagadnienia przeprowadzili Soo i Milian (2001), wykonując próbki betonu z trzech rodzajów cementu: zwykły portlandzki CEM I, odporny na związki siarki CEM V HSR oraz CEM V/SF z dodatkiem pyłu krzemionkowego. Próbk

³ORNL - Oak Ridge National Laboratory (USA)

enced the concrete strength, though the results with large scatter were obtained.

Few researchers only considered the influence of γ radiation on concrete properties only but it is important in the case of the containments in the deposits for nuclear waste storage, Bart et al. (2013). In such structures the shields are exposed for permanent and long-term radiation. Interesting investigations of that problem were carried on by Soo and Milian (2001) on specimens made with concrete with three kinds of cement: ordinary Portland I, Portland V resistant on sulphur compounds and Portland V/SF with addition of silica fume. After 28 days the specimens were subjected to two different radiation procedures: with low intensity of 31 Gy/h and high intensity $3.8 \cdot 10^3$ Gy/h, where low intensity had to simulate situation in the deposits for low active waste. It appeared that the

relative decrease of strength was not dependent on the irradiation dose and that the specimens subjected to low density radiation exposed considerable decrease of strength, Fig. 13. These results indicated that further investigations are needed in order to find out basic relations between doses, intensity and duration of radiation. This is particularly important because in Poland new deposits for nuclear waste storage should be built. Conclusions proposed after large investigations published by Frizon et al. (2009) are concentrated on a precise definition of the concrete properties subjected to long-term radiation. Extensive studies of all problems related to



Rys. 11. Spadek wytrzymałości na rozciąganie w stosunku do próbek porównawczych, Hilsdorf i in. (1978), wg Elleuch i in. (1971) prędkie neutrony; Δ Gray (1972) kruszywo wapienne; \blacktriangle kruszywo krzemionowe; \blacksquare Batten (1960)

Fig. 11. Tensile strength of concrete exposed to neutron radiation f_{ru} related to strength of untreated concrete f_{ru0} , Hilsdorf et al. (1978); after Elleuch i in. (1971) fast neutrons; Δ Gray (1972) limestone aggregate; \blacktriangle flint aggregate; \blacksquare Batten (1960)

po 28 dniach poddano dwóm całkowicie różnym procesom napromienienia: o intensywności niskiej 31 Gy/godz i wysokiej $3,8 \cdot 10^3$ Gy/godz., przy czym niższa intensywność miała symulować zjawisko w składach materiałów mało aktywnych. Okazało się, że względny spadek wytrzymałości nie był zależny od dawki napromienienia, a próbki poddawane promieniowaniu o niewielkiej intensywności wykazały znaczny spadek wytrzymałości (rys. 13). Wyniki tych badań wskazują na potrzebę dalszych poszukiwań zależności spadku wytrzymałości betonu od dawki, intensywności i czasu trwania promieniowania. Jest to szczególnie ważne obecnie w Polsce ze względu na konieczność budowy nowych składowisk odpadów radioaktywnych. Wnioski zaproponowane w obszernym opracowaniu na ten temat przez Frizon i in. (2009) wskazują na konieczność dokładnego określenia właściwości zastosowanego betonu, podanego długotrwałemu napromienieniu. Obszerny zbiór wyników badań i modelowania opublikowano pod redakcją Bart i in. (2013).

4.2. Spadek modułu sprężystości

Na rys. 14 widać wpływ fluencji neutronów na moduł sprężystości próbek, które nie podlegały promieniowaniu ani zmianom temperatury. Wyniki uzyskane przez kilka zespołów badaczy wykazują, że wpływ ten początkowo niewielki, może dochodzić do spadku o ok. 50%. Nie jest oczywiste, że ten spadek może być przypisany bezpośrednio promieniowaniu, ponieważ także występowało podgrzanie betonu przez promieniowanie.

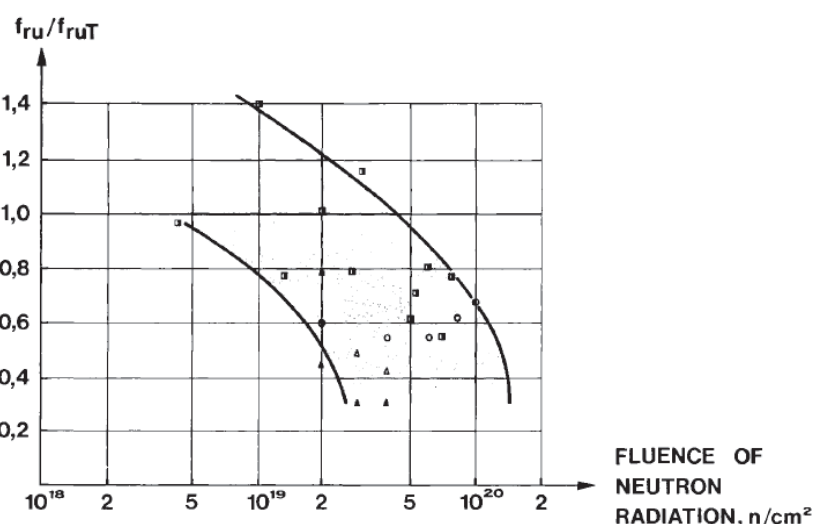
4.3. Inne zmiany właściwości betonu

Wyniki badania wpływu promieniowania γ na pęczanie i skurcz betonu zawarte są w publikacji McDowall (1971). Na rys. 15 pokazano krzywe, z których wynika, że przy niewielkiej dawce napromienienia uzyskano wzrost skurczu i spadek pęczania. Można przewidywać, że przy większych dawkach i spadku wytrzymałości, pęczanie może być zwiększone.

Badania przeprowadzone na próbkach z różnym kruszywem wskazują na spadek przewodności termicznej pod wpływem napromieniania, choć zależność od dawki promieniowania trudno jest określić. Na podstawie wyników zebranych przez Hilsdorfa i in. (1978) można wartości współczynnika przewodności termicznej w stosunku do próbek porównawczych oszacować w sposób następujący, (rys. 16):

- próbki ogrzewane 0,805
- próbki napromieniowane 0,720

Wniosek ogólny, stwierdzający że napromienienie prowadzi do zmniejszenia współczynnika przewodności termicznej o 20÷50 % jest zapewne związany z wpływem nagrzewania. Nie stwierdzono wpływu fluencji neutronów mniejszej od $5 \cdot 10^{19}$ n/cm² na współczynniki odkształcalności termicznej, a większe dawki i promieniowanie γ nie były badane.



Rys. 12. Zależność wytrzymałości na rozciąganie f_{ru} betonu poddanego promieniowaniu neutronowemu w stosunku do wytrzymałości betonu poddanego nagrzewaniu bez promieniowania f_{ruT} , Hilsdorf i in. (1978), wg Elleuch i in. (1971) prędkie neutrony; Δ Gray (1972) kruszywo wapienne \blacktriangle kruszywo krzemianowe; \blacksquare Batten (1960)

Fig. 12. Tensile strength of concrete exposed to neutron radiation f_{ru} related to strength of temperature exposed concrete f_{ruT} , Hilsdorf et al. (1978), after Elleuch i in. (1971) fast neutrons; Δ Gray (1972) limestone aggregate and \blacktriangle flint aggregate; \blacksquare Batten (1960)

storage of radioactive waste were published by Bart et al. (2013).

4.2. Decrease of the modulus of elasticity

In Fig. 14 the influence of neutron fluence on modulus of elasticity is presented in comparison to the specimens that were neither subjected to radiation nor to temperature variations. Test results obtained by a few research teams indicate relatively low influence at the beginning, but next it may reach 50% decrease. It is not clear, however, whether that influence may be attributed directly to irradiation, because concrete is heated also due to the radiation.

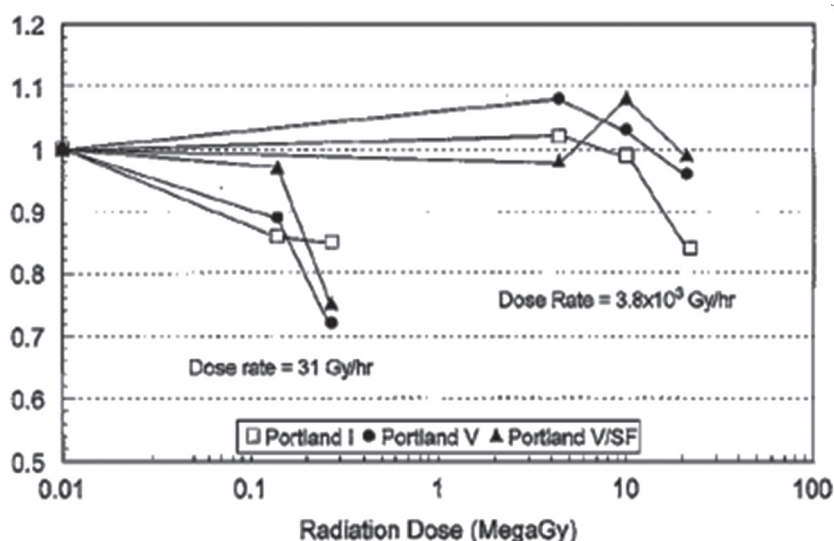
4.3. Other modifications of concrete properties

The test results of the influence of γ radiation on creep and shrinkage of concrete were published by McDowall (1971). In Fig. 15 these results are shown and it may be concluded that already for low doses of radiation an increase of shrinkage and decrease of creep were observed. It may be expected that for higher doses and decrease of strength, creep may have higher values.

These investigations were carried on specimens with different aggregates and the decrease of coefficient of thermal conductivity was also observed while its relation to dose of radiation could not be directly established. On the basis of experimental results collected by Hilsdorfa et al in. (1978) the following values of the coefficient of thermal conductivity may be assumed with respect to the reference specimens as it follows (Fig. 16):

- heated specimens 0.805
- irradiated specimens 0.720

The general conclusion is that after irradiation the coefficient of thermal conductivity decreases by 20÷50 %; this effect is probably



Rys. 13. Wpływ promieniowania γ na względną obniżenie wytrzymałości na ściskanie trzech rodzajów zapraw cementowych, Soo i Milian (2001)

Fig. 13. Effect of γ radiation on the compressive strength of portland cement mortars with three different cements, Soo and Milian (2001)

5. Podatność na promieniowanie neutronowe w zależności od kompozycji betonu

Podawanie w publikacjach wyników różniących się między sobą można przypisać różnicom w składzie betonów i we właściwościach jego składników, badanych przez różnych autorów. Według ogólnych poglądów (m.in. Pedersen 1971) napromienienie prędkimi neutronami powoduje większe zmniejszenie wytrzymałości, co nie jest potwierdzone przez wszystkie wyniki, pokazane na rysunkach 8 i 9. Można powiązać zmniejszenie wytrzymałości ze zmianami objętości kruszywa po napromienieniu.

Wpływ rodzaju kruszywa badał Houben (1969), który podał następujące wartości, charakteryzujące wytrzymałości na ściskanie próbek po promieniowaniu neutronowym $8 \cdot 10^{19}$ n/cm² w stosunku do porównawczych:

- kruszywo barytowe 0,69;
- kruszywo magnetytowe 0,78;
- lekkie kruszywo (hollith) 1,00.

Badania prowadzone w latach 1960÷1970 nie doprowadziły do jednoznacznych rezultatów wpływu składu betonu na odporność na napromienienie i nie jest to całkowicie rozstrzygnięte obecnie. Uzyskano jednak wyniki wskazujące na lepszą odporność betonów z dodatkiem żużla wielkopiecowego do cementu; jednocześnie potwierdzono znaczenie wpływu podwyższonej temperatury.

6. Aktywacja betonów osłonowych

Beton w osłonach podlegających promieniowaniu wykazuje aktywację, co musi być uwzględniane podczas likwidacji i rozbierania reaktorów. Zjawisko aktywacji betonu pod wpływem promieniowania zostało stwierdzone dopiero w 1980 roku; polega ono na powstawaniu radioaktywnych

related to the influence of heating. The impact of neutron influence below $5 \cdot 10^{19}$ n/cm² on the coefficients of thermal deformation is not observed and higher doses are not applied in this respect.

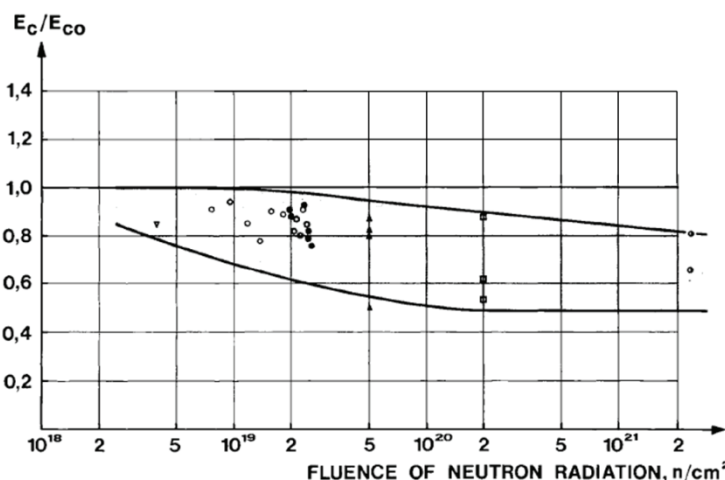
5. Sensitivity to neutron radiation as function of concrete composition

In published papers, quite different results come out as it concerns concrete sensitivity and it may be attributed to differences in composition and in properties of components of the tested concretes. In general, it was considered that irradiation with fast neutrons results in an appreciable decrease of strength, and Pedersen (1971) presented such opinion. This is not confirmed by other available test results, as it is shown in Figs. 8 and 9. The decrease of strength may be related with modifications of aggregate volume after irradiation.

Influence of the kind of aggregate was tested by Houben (1969) and following results were proposed for values of ratio between compressive strength of specimens irradiated by neutron fluence $8 \cdot 10^{19}$ n/cm² and virgin specimens with various aggregates:

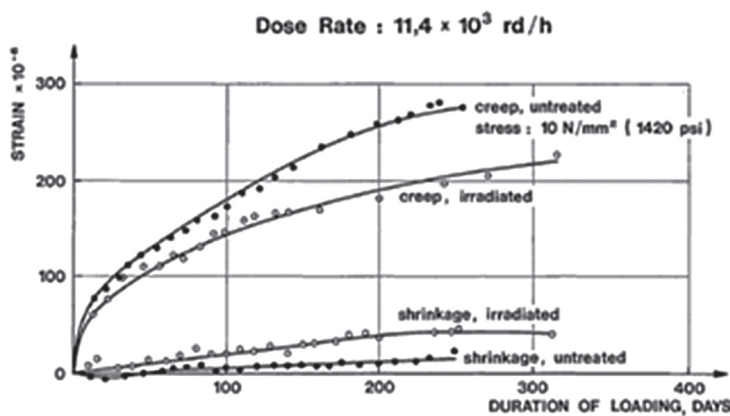
- barite aggregate 0.69;
- magnetite aggregate 0.78;
- lightweight aggregate (hollith) 1.00.

Investigations carried on in years 1960÷1970 did not supply definite answer what is the influence of concrete composition on its resistance against radiation, and it is not quite clear until now.



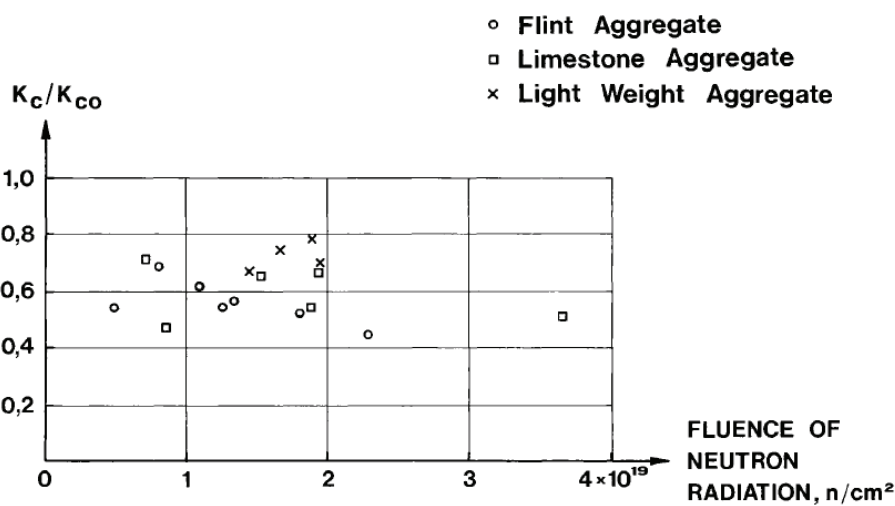
Rys. 14. Zależność stosunku modułów sprężystości od promieniowania neutronowego, Hilsdorf i in. (1978), wg Aleksander (1963); \circ Dubrovskij i in. (1966); \circ Gray (1972); Δ Houben (1969); \square van der Shaaf (1967)

Fig. 14. Modulus of elasticity of concrete after neutron radiation related to that of untreated concrete, Hilsdorf et al. (1978), after Aleksander (1963); \circ Dubrovskij i in. (1966); \circ Gray (1972); Δ Houben (1969); \square van der Shaaf (1967)



Rys. 15. Skurcz i pełzanie próbek betonowych poddanych promieniom γ i próbek porównawczych; próbki izolowane od otoczenia, McDowall (1971)

Fig. 15. Effect of γ radiation on shrinkage and creep of concrete, all specimens sealed, McDowall (1971)



Rys. 16. Stosunek współczynnika przewodności termicznej betonu po promieniowaniu neutronowym do betonu porównawczego, Hilsdorf i in. (1978); \circ kruszywo z krzemienia; \square kruszywo wapienne, \times kruszywo lekkie

Fig. 16. Thermal conductivity of concrete after neutron radiation related to that of untreated concrete; Hilsdorf et al. (1978); \circ flint aggregate; \square limestone aggregate; \times light weight aggregate

izotopów pierwiastków, znajdujących się w betonie. Tylko termiczne i epitermiczne neutrony mogą powodować większą aktywację niektórych jąder atomowych w betonie, aby stały się one radioaktywne, Alhajali i in. (2009). Może to narazić na niebezpieczne napromieniowanie personel, zajmujący się dostarczaniem paliwa i pracami konserwacyjnymi, w obrębie reaktora atomowego. Zagrożenie takie może wystąpić także podczas wyłączenia i rozbierania osłon betonowych. Badania kontrolne próbek takich betonów prowadzi się w odpowiednich terminach, aby zmniejszyć ewentualne zagrożenia.

Informacje o wtórnej radioaktywności γ wywołanej promieniowaniem neutronowym i pozostającej w osłonach cyklotronu na Uniwersytecie Colorado opublikowali Phillips i in. (1986). Wyniki pomiarów przed rozbiórką osłon i przekazaniu terenu do innej działalności, wykazały w betonie obecność m.in. izotopów ^{152}Eu i ^{154}Eu o okresie

However, it was established that concrete with blast furnace slag in cement was more resistant, and the influence of higher temperature was confirmed.

6. Activation of concrete in the shields

Concrete in the shields that are subjected to radiation develop activation which should be taken into consideration when the shield is demolished. The phenomenon of activation of concrete was observed only since 1980; it is developed on the basis of creation of radioactive isotopes of certain elements that are in concrete. Only thermal and epithermal neutrons may cause activation to an appreciable degree of some nucleus in concrete and to transform them into radioactive ones, Alhajali et al. (2009). This situation may expose the personnel to dangerous irradiation during operations related to transport of uranium fuel and conservation of installations in the neighbourhood of nuclear reactor.

Such a threat may appear also when nuclear reactor is demolished and decommissioned. The specimens taken out of the shields are subjected to various kinds of testing after some time and checking in order to reduce possible radiation.

Phillips et al. (1986) published test results on secondary γ radiation due to neutron flux in the concrete shields of a cyclotron at the University Colorado before its decommissioning and leaving building space for other use. Measurements indicated that among other isotopes ^{152}Eu and ^{154}Eu were present with 13.3-y^4 and 8.8-y respectively, and with specific activity of tens of becquerels per kilogram.

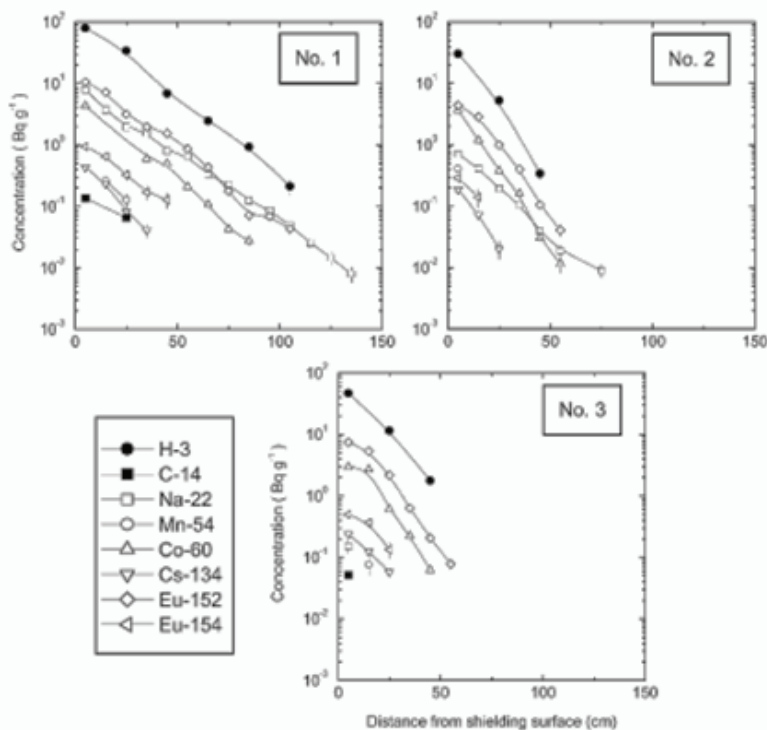
Yarar (1996) published calculations based on data of radiation energy and half-life of decay of particular radioactive elements in ordinary concrete and in special concrete where 10% of aggregate was replaced with colemanite. The results indicated negligible difference between these concretes already after one year of radiation and this may mean a stabilisation. These results were not confirmed by experiments, but on material modelling.

Systematic investigations of γ radiation from isotopes of hydrogen ^3H and carbon ^{14}C were carried on by Endo et al. (2004) in Japan on the specimens sawn out from three different places in concrete shields protecting various installations producing flux of neutrons. The shields were subjected to radiation during over two years. In Fig. 17 diagrams of γ radiation intensity are shown, expressed in Bq/g of concrete mass and in comparison to other isotopes. Rapid attenuation of radioactivity was presented with the depth of concrete layer. The attention of the authors was mainly focused

⁴ This abbreviation means: half-life is defined as the time (years) it takes for one-half of the atoms of a radioactive material to disintegrate.

połowicznego rozpadu odpowiednio 13.3-y⁴ and 8.8-y, przy czym aktywność promieniowania wynosiła zaledwie kilka dziesiątków bekereli na kilogram.

Yarar (1996) podał wyniki obliczeń, opartych na danych o energii promieniowania i o połowicznym okresie rozpadu poszczególnych pierwiastków promieniotwórczych w składzie betonu zwykłego i betonu z kruszywem kolemanitowym, zastępującym 10% masy kruszywa zwykłego. Wyniki wskazały na niewielkie dalsze różnice w radioaktywności tych betonów już po roku trwania napromienienia, co może oznaczać osiągnięcie stabilizacji, ale były to tylko wyniki modelowania, a nie badań materiałowych.



Rys. 17. Stężenie izotopów ³H, ¹⁴C i innych (promieniowanie γ) w funkcji odległości od powierzchni wewnętrznej obudowy, Endo i in. (2004)

Fig. 17. Concentration of ³H, ¹⁴C and γ -ray emitters as a function of distance from the surface of the concrete shielding, Endo et al. (2004)

Systematyczne badania promieniowania γ przez izotopy wodoru ³H i węgla ¹⁴C przeprowadzili Endo i in. (2004) w Japonii, pobierając próbki betonu z trzech różnych miejsc obudowy urządzeń, wytwarzających strumienie neutronów. Osłony były poddane działaniu strumieni neutronów przez okres ponad dwóch lat. Na rys. 17 pokazane są wykresy intensywności promieniowania γ , wyrażone w Bq/g w stosunku do masy betonu, w odniesieniu do tych i innych izotopów. Widać wyraźnie szybkie tłumienie radioaktywności wraz z grubością warstwy betonu. Uwaga badających była skupiona na wymienionych dwóch izotopach radioaktywnych ze względu na ich różną długowieczność, wyrażającą się okresami 12 i ponad 5700 lat połowicznego rozpadu. Rdzenie betonowe zostały wycięte z obudowy akceleratora liniowego elektronów po 33. latach eksploatacji. Określenie radioaktywności ma znaczenie

⁴ Taki skrót oznacza okres połowicznego rozpadu pierwiastka radioaktywnego, wyrażony w latach.

on these two isotopes because of their different long term activity expressed by 12 and over 5700 years of half-decay. Concrete cores were sawn out from the shield of the linear accelerator after 33 years of exploitation. Determination of the radioactivity is important mainly with respect to the decommissioning of such installations. Obtained diagrams indicated that both isotopes should be considered in these operations and parts of protective shields had to be transported to special containments for storage.

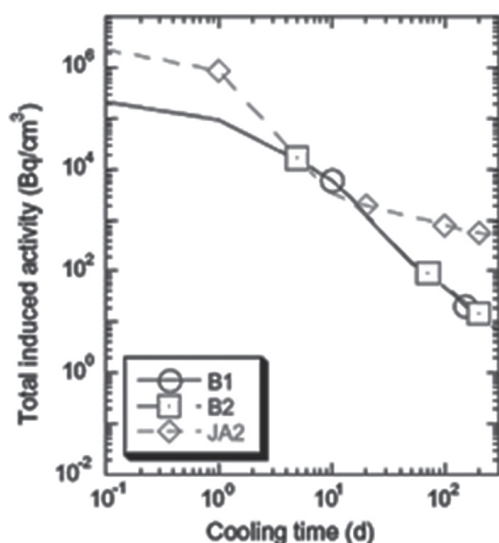
Morioka et al. (2004) obtained a reduction of activity of the shield concrete using addition of 1.0% (B1) and 2.1% (B2) of concrete mass of boron carbide B₄C. Slabs of 200 mm depth made with such concrete were subjected to concentrated flux of neutrons with different energies. Then, radioactivity of that concrete was measured and expressed in Bq/cm³ as function of time since the end of radiation, Fig. 18. It appeared that after 7÷10 days of cooling the specimens with boron carbide demonstrated higher activity than ordinary concrete (JA2), but already after 30 days their activity was at least 100 times lower. This is the argument that the use of concrete shields made with concrete with lower ability for activation is considerably more effective.

Žagar et al. (2004) carried on investigations on long-term radioactivity of concretes with special aggregate like barite. They observed that isotopes ¹³³Ba, ⁶⁰Co and ¹⁵²Eu were able to emit γ fotons during the longest periods of time. On that basis the forecast was proposed that radioactivity of this concrete waste would last up to 100 years as determined after the most durable isotope ¹³³Ba, while its half-life decay is approximately 10 years. The authors indicated that the clearance levels (CL) established by IAEA⁵ should be modified in order to cover correctly the radioactivity of concrete waste.

The influence of γ radiation on the increase of aggregate volume of concrete was observed by Harbsmeier and Bolse (1998), and explained by phase transformation of quartz from crystal form to amorphous one. At the same time, Bouniol and Aspart (1998) found water radiolysis that was described by Maria Skłodowska-Curie, and reactions between calcium Ca and hydrogen peroxide H₂O₂. These processes may induce pressure and cracking of concrete, and also emit gas in the form H₂ – diatomic molecule of hydrogen, which may produce explosion. This is particularly dangerous in the deposits of radioactive waste where radiation is present for a long time.

Radioactivity of concrete is important for decommissioning works when concrete waste is accumulated in the form of rubble. This requires an advanced classification and segregation of concrete from the shields for storage deposits where structural layers of containments are subjected to limited radiation, attenuated by other layers that resist better against radiation. In such a case the volume

⁵ IAEA – International Atomic Energy Agency



Rys. 18. Wykres sumy aktywności próbek betonów B1, B2 i JA2 w funkcji czasu chłodzenia, B1 – 1% Bor; B2 – 2% Bor, JA2 – zwykły beton, Morioka i in. (2004)

Fig. 18. The sum of induced activities detected in the specimens of B1, B2 and JA2 as functions of cooling time, B1 – 1% Bor; B2 – 2% Bor, JA2 – reference concrete, after Morioka et al. (2004)

przede wszystkim ze względu na operacje przy rozbieraniu takiego urządzenia. Uzyskane wykresy wskazują na konieczność uwzględnienia obu izotopów podczas likwidacji reaktorów i przenoszenia fragmentów osłon do zabezpieczonych składowisk.

Zmniejszenie aktywności betonu osłonowego uzyskano przez domieszkę węgla bory B4C w ilości 1,0% (B1) i 2,1% (B2) masy betonu, Morioka i in. (2004). Płyty o grubości 200 mm z betonu tak przygotowanego poddawano oddziaływaniu skupionej wiązki neutronów o różnej energii, a następnie mierzono aktywność ich promieniotwórczości wyrażoną w Bq/cm³ betonu w funkcji czasu od zakończenia napromieniowania, rys. 18. Okazało się, że chociaż po okresie 7÷10 dni chłodzenia próbki z węglikiem bory wykazały większą aktywność w porównaniu do identycznych próbek ze zwykłego betonu (JA2), to jednak już po 30 dniach aktywność tych próbek była co najmniej 100 razy niższa, co uzasadnia wnioski o znacznych korzyściach stosowania betonów osłonowych o zmniejszonej zdolności do aktywacji.

Badania długotrwałej aktywności promieniotwórczej w betonach zawierających specjalne kruszywa, np. barytowe, prowadzili Żagar i in. (2004), którzy stwierdzili najdłuższą trwającą zdolność izotopów ¹³³Ba, ⁶⁰Co i ¹⁵²Eu do emitowania fotonów γ . Na tej podstawie przewidzieli, że promieniotwórczość odpadów betonu zawierających te izotopy będzie trwała do ok. 100 lat, co wynika z najtrwalszego izotopu ¹³³Ba, przy czym okres połowicznego rozpadu wynosi w przybliżeniu 10 lat. Autorzy tej publikacji zwrócili uwagę, że progi dopuszczalności (clearance levels CL) określone przez IAEA⁵ powinny być zmodyfikowane, aby obejmowały w pełni promieniotwórczość odpadów betonowych.

⁵ IAEA – International Atomic Energy Agency

of radioactive waste may be strongly reduced, Sato et al. (2011).

In spite of considerable progress of knowledge achieved in last years on the behaviour of structural concrete subjected to various kinds of radiation, the processes related to activation of concrete are not completely recognized and experimental confirmation of solutions published in literature is necessary, also because of variations of concrete shields composition in different countries. Moreover, it appears that in the majority of installations constructed for nuclear energy plants all kinds of radiation are present and the shields have to correspond to various requirements. The so-called cascade systems of attenuation are particularly necessary for the shields against highly energetic radiation, Ablewicz and Józwick (1978).

Small doses of neutrons below 10¹⁰ n/cm² or 10⁸ Gy of γ radiation that are absorbed during up to 50 years of exploitation have probably limited influence on concrete in the shields. Such assumptions are justified on the basis of present knowledge and recommendations published e.g. by ASME⁶ and ANSI⁷, while longer periods of 100 years are not considered. However many researchers observed reduction of mechanical properties of concrete and opening of cracks after long periods of exploitation. It was not definitely recognized whether reduction of strength was caused only by thermal stressed or with some input of radiation.

Results of the influence of higher doses are different and in certain cases it appeared that for doses over 10¹⁰ n/cm² the compressive and tensile strength might be reduced, depending on energy of neutrons and on concrete components. For doses of neutrons above 10²⁰ n/cm² and for γ radiation over 10⁸ Gy serious shrinkage of cement matrix and expansion of aggregate were observed and apparent damages to concrete structures developed. It was difficult to determine whether these effects were induced by heating and loss of humidity or directly by radiation.

Elevated temperature maintained during long periods results in loss of humidity of concrete, reduction of its strength, modification of modulus of elasticity, lower thermal conductivity and diffusivity, increased creep. It may be assumed that the level of initiation of such degradation is approximately 90°C, and the effects increase with time and temperature; thermal cycles may intensify these effects and induce serious damages in concrete structure.

7. Application of concrete shields and possible hazards

Review of several investigations on the influence of radiation of concrete shields was published by Fillmore (2004), who indicated that there was double action of radiation on concrete protective structures: in the form of modification of concrete microstructure (cement matrix with pores and aggregate) and by increasing temperature due to absorption of energy from radiation. In many

⁶ American Society of Mechanical Engineers

⁷ American National Standards Institute

Wpływ promieniowania γ na wzrost objętości kruszywa w betonie zauważyli Harbsmeier i Bolse (1998), uznając to za skutek transformacji fazowej postaci krystalicznej kwarcu w bezpostaciową. W tym samym okresie Bouniol i Aspart (1998) zwracali uwagę na radiolizę wody, opisaną już przez Marię Skłodowską-Curie, i na reakcje zachodzące między wapnem i nadtlenkiem wodoru H_2O_2 . Zjawiska te mogą wpływać na ciśnienie wewnętrzne i powodować zarysowania w betonie, a także powstawanie gazu w postaci H_2 – dwuatomowej cząsteczki wodoru, który może wywołać eksplozję; jest to szczególnie niebezpieczne w składowiskach odpadów radioaktywnych, w których napromienienie może trwać przez długie okresy.

Napromienienie betonu ma znaczenie przy pracach rozbiórkowych, które prowadzą do nagromadzania odpadów radioaktywnych w postaci gruzu, co wymaga kompetentnego kwalifikowania odpadów betonowych z konstrukcji osłonowych i ich odpowiedniego składowania. Rozważane są rozwiązania projektowe w postaci ścian warstwowych, w których warstwy konstrukcyjne podlegałyby bardzo ograniczonemu promieniowaniu, zatrzymanemu przez specjalne warstwy odporne na aktywację, i w ten sposób objętość odpadów radioaktywnych mogłaby być bardzo zmniejszona, Sato i in. (2011).

Mimo znacznego zwiększenia informacji w ciągu ostatnich kilku lat na temat zachowania się betonów konstrukcyjnych pod wpływem napromienienia, zjawiska szczególnie związane z aktywacją betonu nie są w pełni rozpoznane i konieczne jest doświadczone potwierdzenie wniosków podawanych w publikacjach, m.in. ze względu na różnorodność składu betonów osłonowych w różnych krajach i regionach. Co więcej, okazuje się, że w większości instalacji związanych z energetyką jądrową występują łącznie wszystkie rodzaje opisywanego tu promieniowania, więc osłony muszą zwykle odpowiadać różnorodnym wymaganiom. Zwłaszcza w osłonach przed promieniowaniem wysokoenergetycznym konieczne są tzw. kaskadowe systemy osłabiania, Ablewicz i Józwiak (1978).

Niewielkie dawki neutronów poniżej 10^{10} n/cm² lub 10^8 Gy promieniowania γ pochłonięte w ciągu poniżej 50 lat nie mają zapewne poważnego wpływu na beton. Można tak przypuszczać na podstawie stanu wiedzy i zaleceń, publikowanych m.in. przez ASME⁶ i ANSI⁷, przy czym dłuższe okresy ok. 100 lat nie były rozpatrywane. Jednak liczni badacze stwierdzali tylko niewielkie pogorszenie właściwości mechanicznych i powstawanie rys obserwowanych pod wpływem promieniowania, trwającego przez długie okresy. Nie zostało w pełni wyjaśnione, czy spadek wytrzymałości został spowodowany jedynie w skutek nagrzania i utraty wilgoci, a następnie zarysowania w wyniku naprężeń termicznych, czy także pod wpływem promieniowania.

Wpływ większych dawek nie został definitywnie określony, a informacje na ten temat są rozbieżne. W niektórych przypadkach okazało się, że dawki fluencja przekraczające 10^{10} n/cm² mogą

case it is difficult or impossible to distinguish these effects and their causes.

Modifications that appear in microstructure of concretes as a result of long-term radiation have significant influence on their strength and protective properties. Their durability may be modified also and this decreases their utility. Only since a few years (in 2006) it has been recognized that the layers of special concretes exposed to action of ionising radiation become modified, which means that new compounds appear with other properties than these of initial composite material. There also appear the differences in the microstructure, and radiation has some influence on the crystalline water in hardened cement matrix.

Modifications of concrete microstructure appear also because of the use of special aggregate with high density. Special elements in the aggregate grains allow to reduce the depth of concrete walls with the same mechanical properties, but it is often possible that alkali-aggregate reaction appear due to γ radiation. The phase transformation of crystalline form of silicon oxide SiO_2 in its amorphous form induces the reaction and consequently the expansion of aggregate grains. It depends on amount of kations Na^+ and K^+ in aggregate and in matrix that fills the pores in its fluid form, whether the gel is expansive and it may again induce microcracking.

Cracking of cement matrix may be also due to a great thermal gradient. In the massive concrete structures during hydration of Portland cement in the binder the temperature increases, and thermal gradient may be important. As a result, differences in the values of stresses are created what may cause cracks in the matrix. In order to control such dangerous situations special remedies are commonly applied and temperature is limited. One of the methods is to add granulated slag to cement and to obtain a binder whose hydration and heat exhaustion are reduced during hydration. Moreover, binder containing granulated slag with cement has better chemical resistance. This remedy is only partly useful because while in concrete with binder containing granulated slag, the thermal gradients are reduced, and its resistance against carbonation is lower, Józwiak–Niedźwiedzka (2012), Józwiak–Niedźwiedzka et al (2013).

When the mixture composition is designed for a concrete that will be applied for protective structures against radiation, the following precautions should be taken into consideration, Brandt (2013):

- to ensure high thermal conductivity of concrete in order to control local maxima of temperature;
- to keep concrete drying shrinkage low to avoid additional microcracks;
- to get low value of thermal extension coefficient and to reduce possible deformations related to temperature gradients;
- to use exclusively aggregate that is not susceptible to develop reaction with alkalis;
- to ensure minimum possibility of internal carbonation in concrete.

⁶ American Society of Mechanical Engineers

⁷ American National Standards Institute

spowodować spadek wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie, zależny od energii neutronów oraz składu betonu.

Przy wyższych dawkach fluencji napromienienia, np. 10^{20} n/cm² lub 10^8 Gy promieniowania γ stwierdzono zmniejszenie wytrzymałości i poważny wzrost objętości z powodu pęcznienia kruszywa i skurczu zaczynu cementowego oraz wystąpiły wyraźne uszkodzenia materiału.

Skutkiem długotrwałego działania podwyższonej temperatury jest utrata wody w betonie, prowadząca do spadku wytrzymałości na ściskanie, zmiany modułu sprężystości, pełzania, przewodności termicznej i dyfuzyjności. Na ogół można przyjąć, że próg degradacji odpowiada temperaturze 95°C, a skutki rosną wraz z temperaturą i czasem oddziaływania. Raptowny wzrost temperatury, a także cykle termiczne, mogą powodować poważne uszkodzenia betonu.

7. Eksploatacja betonów osłonowych – możliwe zagrożenia

Przegląd publikowanych badań na temat wpływu promieniowania na osłony betonowe przeprowadził Fillmore (2004), wskazując przede wszystkim na okoliczność, że promieniowanie działa na betonowe osłony dwójako: przez modyfikację struktury materiału (matrycy z porami i kruszywa) oraz przez zwiększanie temperatury betonu na skutek pochłaniania energii promieniowania. Odróżnienie skutków i przyczyn tych dwóch mechanizmów jest trudne lub niemożliwe do przeprowadzenia.

Zmiany w mikrostrukturze betonów zachodzące pod wpływem długotrwałego promieniowania wpływają na ich właściwości osłonowe i wytrzymałość oraz na trwałość, i mogą decydować o zmniejszeniu ich użyteczności. Dopiero od niedawna (2006) zauważono, że warstwy betonów specjalnych, wystawione na działanie promieniowania jonizującego ulegają zmianom, tzn. pojawiają się nowe związki chemiczne o innych właściwościach niż pierwotny kompozyt. Powstają także zmiany w mikrostrukturze a promieniowanie działa na wodę krystalizacyjną, znajdującą się w stwardniałej matrycy cementowej.

Zmiany w mikrostrukturze betonu osłonowego mogą powstać z uwagi na zastosowanie specjalnego kruszywa o dużej gęstości. Wprawdzie zawartość odpowiednich pierwiastków w kruszywie pozwala na zmniejszanie grubości warstw osłonowych przy zachowaniu właściwości mechanicznych, to jednak możliwe jest wystąpienie reakcji alkalicznej kruszywa spowodowanej promieniowaniem γ . Transformacja fazowa postaci krystalicznej tlenku krzemu SiO₂ w bezpostaciową może spowodować wystąpienie reakcji alkalia-kruszywo, co w dalszym kroku może skutkować zwiększeniem objętości kruszywa. Zależnie od ilości kationów Na⁺ i K⁺ obecnych zarówno w kruszywie jak i w matrycy (w fazie ciekłej wypełniającej pory w kompozycie), powstały żel może być ekspansywny, co w dalszej kolejności prowadzi do powstania mikrospełkań.

8. Conclusions

The differences in the results of investigations having been carried on since several years in various countries are considerable because of different testing conditions, various kinds of cements, aggregates and admixture, and due to different proportions of components used in design of concrete mixtures. Applied kinds of radiation and their characteristics were also different for numerous aspects. Moreover, majority of published descriptions of testing procedures are not complete and precise enough. As a result, the state of knowledge presented here is not perfect. However, thanks to the rapid development of test methods it is possible to collect sufficient information for rational design of concrete shields of various kinds.

It may be concluded that basing on the present state of knowledge and on advanced research methods that are available it is possible to attempt for solutions of two groups of problems:

- how to design and build concrete shields for protection of environment and personnel for various kinds of nuclear power plants and various installations exposed to radiation;
- how to ensure durability of these concrete structures exposed to radiation during their exploitation and safe storage of all kinds of nuclear waste.

Considerable increase of published test results in the area of concrete shields against radiation has been noticed, large differences are observed between test results obtained in different laboratories because of different test methods and differences in concrete components and their proportions applied. On the first place it is not known how far concrete strength may be degraded with time and exploitation under radiation. It is certainly easier to determine damages in concrete due to elevated temperature than due to radiation, therefore there is here large space for research in order to obtain clear indication when concrete shield should be replaced in the case of longer exploitation.

In concrete shields the dose of fast neutrons of $5 \cdot 10^{19}$ n/cm² may have an effect in the strength reduction, higher in tension than in compression. There are authors who propose 10^{21} n/cm² as a limit value for slow and thermal neutrons. High doses of radiation and even small increase of temperature may be the reason of swelling of certain components of aggregate, and shrinkage of cement matrix. Consequently, damages of concrete structure are possible. Those doses may be achieved in numerous energy power plants exploited at present, because in many countries their admissible service is extended from 40 to 60 years.

Nevertheless, it is obvious that further research in different directions should be developed as new nuclear power energy plants are planned or under construction, and several hundreds are exploited. New investigations are needed because new generations of reactors are built, new threats are recognized and new possibilities of testing and analyzing are available.

Pękanie matrycy cementowej może również wynikać z powstałego dużego gradientu temperatury. W masywnych konstrukcjach betonowych podczas hydratacji cementu w spoiwie temperatura rośnie, a gradient temperatury jest znaczny. W wyniku tego w betonie występują różnice w wartości naprężeń, co może spowodować mikrorysy i pękanie matrycy. Aby ograniczyć powstawanie takich zagrożeń, podejmuje się środki ograniczające wzrost temperatury. Jednym z nich jest wprowadzenie do matrycy cementu zawierającego żużel wielkopiecowy, ponieważ ciepło hydratacji cementu hutniczego podczas dojrzewania betonu jest znacznie mniejsze. Ponadto cement żużlowy podnosi odporność chemiczną betonu. Jednak z uwagi na zastosowany cement z żużlem wielkopiecowym, który ma ograniczyć powstawanie naprężeń wynikających z różnicy temperatury w dojrzewającym betonie, możliwe jest pogorszenie odporności na karbonatyzację, Jóźwiak–Niedźwiedzka (2012), Jóźwiak–Niedźwiedzka i in. (2013).

Przy projektowaniu betonu przeznaczonego na konstrukcje osłonowe należy szczególnie pamiętać o zapewnieniu, Brandt (2013):

- dużej przewodności cieplnej materiału w celu zmniejszenia do minimum miejscowego wzrostu temperatury,
- niskiego skurczu betonu przy wysychaniu, aby uniknąć mikrorys,
- niskiego współczynnika rozszerzalności cieplnej betonu w celu zmniejszenia do minimum odkształceń spowodowanych gradientami temperatury,
- zastosowania kruszywa niepodatnego na reakcję z alkaliarnymi,
- zminimalizowania możliwości pojawienia się karbonatyzacji wewnętrznej w betonie.

8. Podsumowanie

Różnice w analizowanych wynikach badań prowadzonych od wielu lat i w różnych krajach są znaczne na skutek niejednorodnych warunków przeprowadzania pomiarów, rozmaitych rodzajów cementu, kruszywa i dodatków, a także proporcji składników betonu. Zastosowane rodzaje promieniowania i ich charakterystyki były również rozmaite. Co więcej, brakuje niektórych informacji o przeprowadzonych badaniach albo nie są one dostatecznie dokładne. W rezultacie, obecny stan wiedzy zawiera liczne braki, natomiast postęp metod badawczych umożliwia zebranie i uzyskanie niezbędnych informacji do racjonalnego budowania osłon betonowych.

W konkluzji można stwierdzić, że na podstawie obecnego stanu wiedzy i stosując zaawansowane metody badawcze jest możliwe uzyskiwanie zadowalających rozwiązań w dwóch grupach problemów:

- jak projektować i budować betonowe konstrukcje narażone na promieniowanie w celu osłony otoczenia i personelu w elektrowniach jądrowych i innych zastosowaniach;
- jak zapewnić trwałość betonowych konstrukcji narażonych na promieniowanie podczas okresu eksploatacji, a także w warunkach przechowywania odpadów radioaktywnych.

It may be concluded that as shielding properties of concrete structures are well recognized as well as technique of their design and execution, the influence of long-term radiation on concrete is less recognized and requires further investigations. All investigations related to new constructions should be executed with local materials and in local climatic conditions.

Aknowledgment

This work was prepared in the frame of the project „Durability and efficiency of concrete shields against ionizing radiation in nuclear power structures”, PBS II, National Centre for Research and Development.

Literatura / References

1. Z. Ablewicz, W. B. Dubrowski, Osłony przed promieniowaniem jonizującym, s. 300, Arkady, Warszawa 1986.
2. Z. Ablewicz, B. Jóźwiak, Budownictwo w technice jądrowej, s. 313, Arkady, Warszawa 1978.
3. C. E. Acevedo, M. G. Serrato, Determining the effects of radiation on aging concrete structures of nuclear reactors – 10243, WM2010 Conference, March 7-11, Phoenix, AZ, USA 2010.
4. S. C. Alexander, Effects of irradiation on concrete. Final results. Atomic Energy Research Establishment, p. 34, Harwell 1963.
5. S. Alhajali, M. H. Kharita, B. Naom, S. Yusef, M. Al Nassar, Estimation of the activation of local reactor shielding concretes. Progress in Nuclear Energy, **51**, 374-377 (2009).
6. F. Bart, C. Cau-dit-Coumes, F. Frizon, S. Lorente, eds., Cement-based materials for nuclear waste storage, p. 264, Springer 2013.
7. A. W. Ch. Batten, Effect of irradiation on the strength of concrete. Atomic Energy Research Establishment, p. 13, Harwell 1960.
8. V.V. Bertero, G. W. Polivka, Influence of thermal exposures on mechanical characteristics of concrete. ACI, Concrete for Nuclear Reactors, SP 34, 505-531 (1972).
9. P. Bouniol, A. Aspart, Disappearance of oxygen in concrete under irradiation: the role of peroxides in radiolysis. Cem. & Concr. Res., **28**, 11, 1669-1681 (1998).
10. A. M. Brandt, D. Jóźwiak-Niedźwiedzka, Diagnosis of Concrete quality by structural analysis, Advances in Civil Engineering Materials, **1**, 1, 1-21 (2012).
11. A. M. Brandt, Beton jako materiał osłon w budownictwie związanym z energetyką jądrową. Cement Wapno Beton, **80**, 2, 115-132 (2013).
12. R. J. Clifton, Predicting the remaining service life of concrete. NIS-TIR-4712, s. 74, 1991.
13. S. Divya Rani, M. Santhanam, Influence of moderately elevated temperatures on engineering properties of concrete used for nuclear reactor vaults. Cem. & Concr. Comp., **34**, 917-923 (2012).
14. V. B. Dubrovskij, Sh. Sh. Ibragimov, A. Ya. Ladygin, B. K. Pergamenshchik, The effect of neutron irradiation on certain properties of refractory concrete. Atomnaya Energiya 21, pp. 108-112 (1966).
15. M. R. Elleuch, F. Dubois, J. Rappenau, Effects of neutron radiation on special concretes and their components. ACI SP34-51, vol. II, 1071-1108 (1972).

Pomimo wzrostu zakresu i jakości badań w dziedzinie osłon betonowych, to jednak różnice w wynikach badań w różnych ośrodkach są znaczne na skutek niejednakowych warunków przeprowadzania pomiarów oraz rozmaitych rodzajów kruszywa i cementu, a także proporcji składników betonu. Przede wszystkim brakuje danych doświadczalnych jak daleko może się rozwinąć spadek wytrzymałości betonu pod wpływem napromieniowania. Znacznie łatwiej jest ocenić uszkodzenia, spowodowane odkształceniami termicznymi niż długotrwałym promieniowaniem. Nie ulega więc wątpliwości, że istnieje w tych zagadnieniach obszerne pole do dalszych badań, aby uzyskać informacje. Kiedy występuje konieczność wymiany elementów osłony betonowej w przypadku przedłużania okresu eksploatacji.

W betonach osłonowych dawka fluencji szybkich neutronów równa $5 \cdot 10^{19}$ n/cm² może spowodować redukcję wytrzymałości, większą na rozciąganie niż na ściskanie, a także spadek modułu sprężystości betonu. Dla powolnych i termicznych neutronów niektórzy autorzy proponują przyjąć 10^{21} n/cm² jako wartość graniczną. Wysokie dawki promieniowania i nawet niewielki wzrost temperatury mogą powodować wyraźny wzrost objętości składników kruszywa, a to z kolei może spowodować uszkodzenia betonu. Wymienione dawki promieniowania mogą być osiągnięte i przekroczone w wielu obecnie eksploatowanych elektrowniach atomowych, ponieważ w licznych krajach przyjmowane są okresy dopuszczalnej eksploatacji przedłużone w stosunku do pierwotnych, np. z 40 do 60 lat.

Jest oczywiste, że dalsze badania w różnych kierunkach są niezbędne, zwłaszcza wobec planowania i budowy nowych elektrowni jądrowych, a wiele setek jest już eksploatowanych. Potrzeby badawcze wzrastają wraz z nowymi rodzajami reaktorów i lepszym rozpoznaniem zagrożeń, a jednocześnie rozszerzają się możliwości pomiarowe i analityczne

O ile właściwości osłonowe betonów zostały dosyć dobrze określone i wiedza na temat projektowania i wykonywania osłon jest obszerna, to zagadnienia związane z długotrwałym oddziaływaniem różnego rodzaju promieniowania w instalacjach reaktorów jądrowych wymagają dalszych badań, przy czym podstawowe prace związane z bezpieczeństwem powinny być prowadzone w lokalnych warunkach klimatycznych i przy użyciu lokalnych materiałów.

Podziękowanie

Artykuł został napisany w ramach przygotowań do projektu „Trwałość i skuteczność betonowych osłon przed promieniowaniem jonizującym w obiektach energetyki jądrowej”, PBS II, NCBiR.

16. A. El-Sayed Abdo, E. Amin (2001) Distribution of temperature rise in biological shield due to thermal neutrons. *Annals of Nuclear Energy*, **28**, 275-283 (2001).
17. A. Endo, Y. Harada, K. Kawasaki, M. Kikuchi, Measurement of depth distributions of ³H and ¹⁴C induced in concrete shielding of an electron accelerator facility. *Applied Radiation and Isotopes*, **60**, 955-958 (2004).
18. D. L. Fillmore, Literature review of the effects of radiation and temperature on the aging of concrete. Idaho Nat. Eng. and Env. Lab., Idaho Falls, Idaho 83415, pp 26, 2004.
19. F. Frizon, S. Gin, C. Jegou, Mass transfer phenomena in nuclear waste packages, w: L.Q. Wang (ed.) *Advances in Transport Phenomena*, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg 2009.
20. S. Granata, A. Montagnini, Studies on behavior of concrete under irradiation. *ACI Concrete for Nuclear Reactors SP-34*, vol. II, 1163-1172 (1972).
21. B. S. Gray, The effect of reactor radiation on cements and concrete. *Comm. of the European Communities, Luxembourg*, 17-39 (1972).
22. F. Harbsmeier, W. Bols, Ion beam induced amorphization in α quartz. *J. of Applied Physics*, **83**, 8, 4049-4054 (1998).
23. H. K. Hilsdorf, J. Kropp, H. J. Koch, The effects of nuclear radiation on the mechanical properties of concrete. *ACI*, SP 55-10, 223-251 (1978).
24. J. A. Houben, Radiation of mortar specimens. *Comm. of the European Communities, Brüssels*, 170-183 (1969).
25. T. Ichikawa, T. Kimura, Effect of nuclear radiation on alkali-silica reaction of concrete. *J. of Nuclear Science and Technology*, **44**, 10, 1281-1284 (2007).
26. D. Józwiak-Niedźwiedzka, Influence of blended cements on the concrete resistance to carbonation, *Proc. Int. Symp. Brittle Matrix Composites, BMC-10*, 125-134, October 15-17, Warsaw 2012.
27. D. Józwiak-Niedźwiedzka, M. Sobczak, K. Gibas, Carbonation of concretes containing calcareous fly ashes, *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **12**, 131-144 (2013).
28. O. Kontani, Y. Ichikawa, A. Ishizawa, M. Takizawa, O. Sato, Irradiation effects on concrete structure. *Int. Symp. on the Ageing Manag. of Nucl. P. P.*, 173-182 (2010).
29. A. Łowinska-Kluge, P. Piszora, Effect of gamma irradiation on cement composites observed with XRD and SEM methods in the range of radiation dose 0 – 1409 MGy. *Acta Physica Polonica A*, **114**, 399-411 (2008).
30. D. C. McDowall, The effect of gamma irradiation on the creep properties of concrete. *Comm. of the European Communities*, 55-69, Luxembourg 1971.
31. A. Morioka, S. Sato i in., Irradiation and penetration tests of boron-doped low activation concrete using 2.45 and 14 MeV neutron sources. *J. of Nuclear Mat.* 329-333, 1619-1623 (2004).
32. D. R. Ochbelagh, S. A. Khani, H. G. Mosavinejad, Effect of gamma and lead as an additive material on the resistance and strength of concrete. *Nuclear Engineering and Design* **241**, 2359-2363 (2011).
33. A. Pedersen, (1971) Radiation damage in concrete – measurements on miniature specimen of cement mortar. *Comm. of the European Communities*, 5-18, Luxembourg 1971.
34. A. B. Phillips, D. E. Prull, R. A. Ristinen i in., Residual radioactivity in a cyclotron and its surroundings. *Health Phys.*, **51**, 337-342 (1986).
35. J. B. Pickett, (2000) Deactivation of the P, C and R reactor disassembly basins at the SRS WSRC-MS-2000-00640, Rev.1. Retrieved June 11, 2009, from http://www.osti.gov/bridge/product.biblio.jsp?queryid=1&page=0&osti_id=772667

36. B. Pomaro, V. A. Salomoni, F. Gramegna, G. Prete, C. E. Majorana, Radiation damage evaluation on concrete shielding for nuclear physics experiments. *Ann. Solid Struct. Mech.*, 2, 123-142 (2011).
37. B. T. Price, C. C. Horton, K. T. Spinney, Radiation shielding. *Int. Series of Monograph on Nuclear Energy*, pp. 276-278, Pergamon Press, N. York, London, Paris, 1957.
38. K. Sakr, E. EL-Hakim, Effect of high temperature or fire on heavy weight concrete properties. *Cem. & Concr. Res.*, **35**, 590-596 (2005).
39. V. Sopko, K. Trtík, F. Vodák, Influence of γ irradiation on concrete strength. *Acta Polytechnica*, **44**, 1, 57-58 (2004).
40. J. F. Sommers, Gamma radiation damage of structural concrete immersed in water. *Health Physics*, Pergamon Press, 16, 503-508 (1969).
41. B. Stoces, P. Otopal, V. Juricka, J. Gabriel, The effect of radiation on the mechanical properties of concrete. *Ceskoslovenska Akademie*, transl. from the Czech by ORNL.
42. C. F. Van der Schaaf, Effect of heating and radiation on some properties of mortar and concrete specimens with different compositions. *Com. of the Europ. Comm.*, Brussels, pp. 43-71 (1967).
43. F. Vodák, K. Trtík, V. Sopko, O. Kapičková, P. Demo, Effect of γ -irradiation on strength of concrete for nuclear-safety structures. *Cem. & Concr. Res.*, 35, 1447-1451 (2005).
44. F. Vodák, V. Vydra, K. Trtík, O. Kapičková, Effect of gamma irradiation on properties of hardened cement paste. *Materials and Structures*, **44**, 101-107 (2011).
45. Y. Yarar, Activation characteristics of concrete shields containing colemanite. *J. of Nuclear Materials*, 233-237, 1511-1515 (1996).
46. T. Žagar, M. Božič, M. Ravnik, Long-lived activation products in TRIGA Mark II research reactor concrete shield: calculation and experiment. *J. of Nuclear Mat.*, 335, 379-386 (2004).
47. ACI 349.3R-02 Evaluation of Existing Nuclear Safety-Related Concrete Structures.
48. DIN 25 413, teil 1-1991, Klassifikation von Abschirmbetonen nach Elementanteilen, Abschirmung von Neutronenstrahlung.
49. DIN 25 413, teil 2-1991, Klassifikation von Abschirmbetonen nach Elementanteilen, Abschirmung von Gammastrahlung.