

10



**DETEKCJA PROMIENIOWANIA
POLON-ALFA - NAJNOWSZA TECHNOLOGIA
ZESTAWY KRYTYCZNE**

Na okładce:

makieta budynku głównego i przekrój reaktora w amerykańskiej elektrowni Vermont Yankee przygotowana przez US. Nuclear Regulatory Commission (NRC) na spotkanie z okolicznymi mieszkańcami.

Typ: Boiling Water Reactor

Moc: 1,912 MW

Producent: General Electric Type 4

Containment (obudowa reaktora): Wet, Mark I

Spotkanie odbyło się w Liceum Brattleboro 10 km od elektrowni, gdzie przedstawiono raport roczny NRC oraz omówiono zabezpieczenia przeciwko bezpośredniemu uderzeniu samolotu. Przeciwnicy energetyki jądrowej wykazują że reaktory tej konstrukcji (MK1) są podatne na uszkodzenia w wyniku ataku samolotu. Model ten pokazał, że paliwo jest kilka pięter poniżej podłogi, za grubą ścianą zewnętrzną i grubymi ścianami basenu .



US Nuclear Regulatory Commission (NRC) został stworzony jako niezależna agencja przez Kongres w 1974 roku w celu zapewnienia bezpiecznego korzystania z materiałów radioaktywnych do celów cywilnych, przy jednoczesnej ochronie ludzi i środowiska. NRC nadzoruje komercyjne elektrownie jądrowe i inne zastosowania materiałów jądrowych, np. w medycynie i przemyśle.



ul. Świętokrzyska 14 00-050 Warszawa
tel. 22 336 14 19 fax. 22 336 14 25
www.ekoatom.com.pl
E-mail: redakcja@ekoatom.com.pl

SKŁAD REDAKCJI

Redaktor Naczelny

dr inż. Krzysztof Rzymkowski,
dr inż. Marek Rabiński,
dr inż. Andrzej Mikulski,
dr inż. Piotr Czerski (PGE),
Sekretarz Redakcji
mgr Jerzy Szczurowski (SEP COSIW)
Redaktor Techniczny
Jarosław Cyrynger (SEP COSIW)

RADA PROGRAMOWA:

Przewodniczący

prof. dr hab. Maciej Sadowski,
Członkowie
prof. dr hab. Janusz Lewandowski (PW),
prof. dr hab. Łukasz Turski (UW)
prof. dr hab. Zdzisław Celiński,
prof. dr Andrzej Strupczewski,
prof. dr hab. Natalia Golnik (PW)
prof. dr hab. inż. Roman Domański

DOŁĄCZ I ZOBACZ RELACJE FOTOGRAFICZNE



Redakcja zastrzega sobie prawo dokonywania skrótów, korekty, edycji nadesłanych materiałów, oraz nie zwraca materiałów niezamówionych. Redakcja zastrzega sobie prawo do publikacji materiałów w dogodnym dla redakcji czasie i kolejności oraz niepublikowania materiału bez podania przyczyny.

Redakcja nie odpowiada za treść zamieszczonych reklam ogłoszeń i innych płatnych.

EKOATOM JEST PRAWNIE ZASTRZEŻONYM
ZNAKIEM TOWAROWYM

Centralny Ośrodek Szkolenia i
Wydawnictw

Ul. Świętokrzyska 14
00-050 Warszawa
tel. 22 336 14 19 fax. 22 336 14 25

www.cosiw.pl
e-mail: handlowy@cosiw.pl

Redaktor Naczelny
Dr inż. Krzysztof Rzymkowski

Szanowni Państwo,



Z satysfakcją prezentujemy już dziesiąty numer kwartalnika EKOATOM. Z przyjemnością odnotowujemy nadal wzrastającą popularność czasopisma. Potwierdzeniem tej popularności i roli jaką odgrywa czasopismo jest częstotliwość odwiedzania strony EKOATOM nawet w okresie wakacyjnym. Ze swej strony będziemy nadal dokładać starań, by atrakcyjność naszego pisma rosła, czego próbą jest zmiana układu strony i wprowadzenie dodatkowych ułatwień umożliwiających szybsze dotarcie do poszukiwanych informacji.

Obecny numer prezentuje następujące materiały:

- unikalny o współpracy naukowców amerykańskich, rosyjskich i kazachskich (J. Chmielewski)
- przegląd zestawów krytycznych - reaktorów doświadczalnych pozwalających na sprawdzenie założeń teoretycznych, modeli matematycznych odwzorowujących pracę reaktora oraz weryfikację przewidywanych i związanych z nią charakterystyk zachodzących innych procesów, (K. Rzymkowski).
- dotyczące pojawiania się trucizn reaktorowych - substancji silnie pochłaniające neutrony produkowane są także w reaktorze w procesie rozszczepienia jąder paliwa, np. uranu (S. Kilim).
- omówienie podstaw detekcji promieniowania (K. Fornalski)
- historię i zakres działań jednego z zakładów polskiego przemysłu jądrowego produkującego unikalną aparaturę dozymetryczną (D. Jankowski)
- szczegółowe omówienie zagadnień związanych ze strefą – obszarem ograniczonego użytkowania wokół obiektów jądrowych (P. Czerski)
- analizę sezonowych zmian stężenia promieniotwórczego Pb-210 w przyziemnej warstwie powietrza (K. Isajenko, M. Fajak, P. Lipiński)

Kontynuujemy również cykl artykułów o wykorzystaniu techniki jądrowej w medycynie (J. Chmielewski)

Redakcja EKOATOMu stara się dla Państwa śledzić losy budowy pierwszej elektrowni jądrowej w Polsce. Z wystosowanej w ostatnim czasie przez Ministerstwo Gospodarki odpowiedzi na interpelację poselską w sprawie polskiego programu jądrowego interpelację Ministerstwo Gospodarki wynika, że jedną z przyczyn opóźnienia były przeciągające się uzgodnienia międzynarodowe i krajowe mające na celu zapewnienie bezpieczeństwa ludności i ochrony środowiska oraz konieczność wprowadzenia modyfikacji w Polskim Programie Energetyki Jądrowej uwzględniającej nowelizację „prawa atomowego”. Ponadto opóźnienie spowodowane jest urealnieniem planów inwestycyjnych przez głównego inwestora (PGE) Początkowo projektowano uruchomienie pierwszego bloku w 2020 - obecnie termin przesunięto na 2024. Pozwolenie na budowę i budowa pierwszego bloku pierwszej polskiej elektrowni jądrowej ma przypaść na okres 1.01.2019 - 31.12.2024.

W dalszym ciągu oczekujemy na stanowisko Rządu RP w sprawie Memorandum dotyczącego energetyki jądrowej w Polsce, wystosowanego przez reprezentantów następujących podmiotów: Pana Prezesa Andrzeja G. Chmielewskiego z ramienia SEREN, Pana Prezesa. Jerzego Barglika z ramienia SEP, Panią Prezes Ewę Mańkiewicz-Cudny w imieniu FSNT NOT, oraz Pana Prezesa Zbigniewa Zimka w imieniu PTN, które zostało skierowane do Kancelarii Premiera w dniu 25. 07. 2012.

Oczekujemy także na stanowisko w sprawie Listu do Ministra Gospodarki dotyczącego energetyki jądrowej w Polsce, wystosowanego przez Pana Prezesa SEREN Andrzeja G. Chmielewskiego, Pana Prezesa SEP Jerzego Barglika, Panią Prezes FSNT NOT Ewę Mańkiewicz-Cudny, Pana Prezesa PTN Zbigniewa Zimka, które zostało skierowane do Pana Premiera J. Piechocińskiego w dniu 15. 04. 2013.

Ponownie pragniemy podkreślić, że pojawiające się obecnie trudności finansowe związane z polityką oszczędnościową stwarzają poważne problemy w realizacji celów czasopisma. Czasopismo EKOATOM powstało w celu upowszechniania i uzupełniania w społeczeństwie wiedzy w dziedzinie techniki jądrowej.

Jak już wspomniano w poprzednich numerach postanowiono, by czasopismo było powszechnie dostępne w Internecie bez żadnych dodatkowych opłat ze strony czytelników. Oszczędności budżetowe powodują znaczne spowolnienie programu promocji i mogą spowodować zawieszenie lub zakończenie wydawania kwartalnika. Dlatego też zwracamy się ponownie do wszystkich zainteresowanych kontynuacją istnienia czasopisma o pomoc.

Jak zwykle, wszystkich chętnych, a przede wszystkim specjalistów, serdecznie zapraszamy do współpracy i publikowania na naszych łamach

Spis treści

KRZYSZTOF RZYMKOWSKI	9
ZESTAWY KRYTYCZNE - Reaktory doświadczalne	9
Przeznaczenie zestawów krytycznych.....	9
Klasyfikacja zestawów krytycznych.....	10
Konstrukcje zestawów krytycznych	11
Zestawy krytyczne o konstrukcji pionowej (<i>vertical integral</i>)	11
Zestawy krytyczne o konstrukcji horyzontalnej (<i>horizontal split bed</i>)	15
Literatura:.....	19
STANISŁAW KILIM	21
Trucizny reaktorowe.....	21
Wstęp	21
Wpływ trucizn – Xe-135 i Sm-149 na bilans neutronów w reaktorze termicznym	21
Długofalowe objawy działania trucizn reaktorowych.....	23
Jeszcze jedna trucizna – Pa-233	25
Wykorzystanie trucizn do sterowania reaktorem przez człowieka	25
Pręty regulacyjne	26
Kwas borny jako trucizna wypalająca, rozpuszczalna w moderatorze	27
Stałe trucizny wypalające.....	28
Podsumowanie.....	30
Literatura:.....	30
Jerzy Chmielewski	31
RATUJMY ŚWIAT PRZED GÓRĄ PLUTONU.....	31
Jedna z najdonioślejszych historii o nierozprzestrzenianiu broni jądrowej o której nigdy nic nie mówiono	31
Krzysztof Wojciech Fornalski	35
KRÓTKO O PODSTAWACH DETEKЦИИ PROMIENIOWANIA	35
Wstęp	35
Izotopy.....	35
Czas połowicznego zaniku izotopów.....	35
Aktywność.....	36
Detekcja promieniowania	36
Zjawiska fizyczne przy oddziaływaniu promieniowania z materią	37
Pojęcie dawki promieniowania	38

Daniel Jankowski Specjalista ds. dozymetrii POLON-ALFA Sp. z o.o. Sp.k.	41
PRZENOŚNE DETEKTORY PROMIENIOWANIA JONIZUJĄCEGO NA PRZYKŁADZIE APARATURY DOZYMTRYCZNEJ POLON-ALFA.	41
Radiometr RK-100	45
Radiometr uniwersalny RUM-2.....	47
Sondy scyntylacyjne.	48
Monitor promieniowania gamma PM-1401M.....	49
Wykrywacz kontrabandy PM-1703T	50
Radiometr DPO	50
Piotr Czerski	52
„OBSZAR OGRANICZONEGO UŻYTKOWANIA” WOKÓŁ ELEKTROWNI JĄDROWEJ.....	52
Jak to jest z tymi obszarami ograniczonego użytkowania w praktyce?.....	52
Jaka jest idea tworzenia obszarów ograniczonego użytkowania?.....	53
Obszar ograniczonego użytkowania wokół elektrowni jądrowej	54
Warunki przy normalnej eksploatacji	54
Awarie EJ, a granice Obszaru Ograniczonego Użytkowania	55
Zakres wymaganych analiz.....	56
Ograniczenia dotyczące Obszaru Ograniczonego Użytkowania w pobliżu elektrowni jądrowej	57
Konkluzje	58
Literatura:.....	59
Jerzy Chmielewski	60
"ATOMOWA" DIAGNOSTYKA MEDYCZNA	60
Cz. III Metody wykorzystujące Magnetyczny Rezonans Jądrowy	60
BARBARA PIOTROWSKA, KRZYSZTOF ISAJENKO, MARIAN FUJAK, PAWEŁ LIPIŃSKI	68
Analiza sezonowych zmian stężenia promieniotwórczego Pb-210 w przyziemnej warstwie powietrza atmosferycznego	68
Wprowadzenie	68
Aparatura pomiarowa	69
Wyniki pomiarów	70
Wnioski.....	73
Literatura:.....	73



Dariusz Lubera, prezes zarządu Tauron Polska Energia ocenia, że sygnatariusze listu intencyjnego ws. udziału w budowie elektrowni jądrowej w Polsce do końca września br. ustalą szczegóły tego porozumienia.

- Jestem optymistą i oceniam, że porozumiemy się. Nie ma poważnych trudności wśród partnerów tego listu, jest natomiast dużo pracy. Wpływ na przedłużenie negocjacji miało [m.in.](#) połączenie się PGE ze spółką PGE Energia Jądrowa, która miała być odpowiedzialna za przygotowanie projektu budowy elektrowni jądrowej - mówi Dariusz Lubera, prezes zarządu Tauron Polska Energia. Dariusz Lubera przypomina, że od dawna mówi, że w budowie pierwszej polskiej elektrowni jądrowej powinny uczestniczyć krajowe grupy energetyczne.

- Tauron potrzebuje niskoemisyjnych źródeł wytwarzania energii, a tu mamy źródło zeroemisyjne. Chcemy poprzez tą inwestycję „wykupić” prawo do części energii z tej elektrowni - wyjaśnia Dariusz Lubera.

PGE Polska Grupa Energetyczna, Tauron Polska Energia, KGHM Polska Miedź oraz Enea podpisały 5 września 2012 r. list intencyjny dotyczący nabycia udziałów w spółce celowej, powołanej do budowy i eksploatacji pierwszej polskiej elektrowni jądrowej.

Zgodnie z listem, spółki podejmą się wypracowania projektu umowy nabycia udziałów w PGE EJ 1, czyli spółce celowej, która odpowiada za bezpośrednie przygotowanie procesu inwestycyjnego budowy i eksploatacji pierwszej polskiej elektrowni jądrowej. Umowa ma regulować prawa i obowiązki każdej ze stron przy realizacji projektu, przy założeniu, że PGE Polska Grupa Energetyczna będzie pełnić, bezpośrednio lub poprzez podmiot zależny, rolę wiodącą w procesie przygotowania i realizacji projektu. W liście podkreślono, że PGE przy wykorzystaniu spółek celowych rozpoczęła prace związane z przygotowaniem budowy pierwszej polskiej elektrowni jądrowej, w tym prace związane z rozpoznaniem i zapewnieniem standardów, w jakich prowadzone są inwestycje jądrowe na świecie.

Zgodnie z podpisanym czerwcu 2013 r. aneksem strony porozumienia uzgodniły, że termin obowiązywania porozumienia mija 30 września 2013 r., istnieje jednak możliwość przedłużenia okresu jego obowiązywania o jeden kwartał.

Autor: Dariusz Ciepiela Źródło: [wnp.pl](#)



PGE EJ 1 Sp. z o.o.

Zakończenie etapu mobilizacji badań lokalizacyjnych i środowiskowych

2 września 2013 r. WorleyParsons, wykonawca badań lokalizacyjnych i środowiskowych dla pierwszej polskiej elektrowni jądrowej zakończył pierwszy etap prac przygotowawczych, tzw. mobilizację do projektu, obejmującą szczegółowe planowanie prac w zakresie m.in. zarządzania jakością, bezpieczeństwa prac, zarządzania ryzykiem, ochrony środowiska, opracowania szczegółowych metodyk dla inwentaryzacji przyrodniczej oraz harmonogramu realizacji prac. Tym samym rozpoczął się drugi etap badań - uruchomienie badań terenowych w lokalizacjach.

Badania lokalizacyjne i środowiskowe prowadzone będą równolegle w dwóch lokalizacjach – „Choczewo” (gm. Choczewo) oraz „Żarnowiec” (gm. Gniewino i Krokowa). Badania prowadzone są zgodnie z polskimi przepisami oraz międzynarodowymi standardami i najlepszymi praktykami. Zgodnie z założeniami badania środowiskowe potrwać co najmniej rok, a lokalizacyjne – co najmniej dwa lata.

PGE EJ 1 Sp. z o.o. odpowiada za bezpośrednie przygotowanie procesu inwestycyjnego, przeprowadzenie badań lokalizacyjnych oraz uzyskanie wszelkich niezbędnych decyzji warunkujących budowę elektrowni jądrowej. PGE EJ 1 Sp. z o.o. odpowiada także za przeprowadzenie postępowania na wybór technologii przyszłej elektrowni jądrowej.

WorleyParsons to podmiot o ponad pięćdziesięcioletnim międzynarodowym doświadczeniu w realizacji projektów jądrowych. Firma uczestniczyła w projektach m.in. w Bułgarii, Rosji, Słowenii, Słowacji, Szwecji, Turcji, Egipcie, Południowej Afryce, Kanadzie, Meksyku, USA i Armenii. WorleyParsons jest światowym liderem w zakresie inżynierskich usług jądrowych. Specjalizuje się we wsparciu dla dużych nowych projektów jądrowych. W ostatnich latach odpowiadał za proces wyboru lokalizacji dla przyszłej elektrowni jądrowej, a także przeprowadzenie badań środowiskowych w projekcie realizowanym w Turcji (elektrownia jądrowa Akkuyu).



Spółka PGE EJ 1 ogłosiła wieloletni program współpracy z uczelniami wyższymi. Jego główny cel to zainteresowanie studentów i kadry naukowej tematem energetyki jądrowej, promocja młodych naukowców oraz budowanie szerokiego zaplecza eksperckiego potrzebnego do rozwoju energetyki jądrowej. Inauguracja programu odbyła się na Politechnice Gdańskiej z udziałem jej rektora prof. dr. hab. Henryka Krawczyka oraz prezesa zarządu PGE EJ 1 Aleksandra Grada. Wykład inauguracyjny „Rozwój energetyki jądrowej jako dobre rozwiązanie dla Polski” wygłosił profesor Wacław Gudowski, fizyk z Królewskiego Instytutu Technologii w Sztokholmie.

Podstawowym celem programu jest zainteresowanie studentów i młodych naukowców tematyką związaną z energetyką jądrową. Adresowany jest nie tylko do osób zajmujących się naukami ścisłymi czy technicznymi, ale również naukami społecznymi, medycznymi czy przyrodniczymi. – Energetyka jądrowa będzie potrzebować specjalistów z wielu dziedzin, m.in. energetyków, fizyków, ale również socjologów, prawników czy finansistów. Mam nadzieję, że nasz program pozwoli studentom i naukowcom zobaczyć szanse, jakie dla ich rozwoju zawodowego i naukowego oferuje energetyka jądrowa – powiedział Aleksander Grad.

Program składa się z dwóch modułów. W ramach pierwszego – konkursowego – PGE EJ 1 będzie nagradzać najlepsze prace z różnych dziedzin wiedzy poruszające temat energetyki jądrowej. Odrębne konkursy będą organizowane dla studentów, absolwentów oraz doktorantów i kadry naukowej. W przypadku studentów rywalizacja będzie dotyczyć opracowania wybranego zadania konkursowego. Zadania będą dotyczyć zarówno polityki energetycznej, ekonomii, ale również medycyny czy turystyki. Konkurs dla absolwentów będzie realizowany we współpracy z Polskim Towarzystwem Nukleonicznym, które już od 15 lat wybiera najlepszą pracę magisterską z zakresu atomistyki. Formuła konkursu zostanie jednak znacząco poszerzona: obejmować będzie również prace licencjackie i inżynierskie a także doktorskie. Ponadto, inaczej niż dotąd, jury będzie oceniać również prace z dziedzin nietechnicznych. Szerokie ujęcie kwestii związanych z energetyką jądrową dotyczy również konkursu dla doktorantów i kadry naukowej – w ich przypadku nagradzane będą najlepsze publikacje naukowe. Kolejny konkurs skierowany jest do kół naukowych. Jego przedmiotem będzie opracowanie scenariusza wydarzenia, promującego wiedzę o energetyce jądrowej na uczelniach. Laureaci dostaną fundusze na realizację swoich pomysłów. Na drugi moduł programu PGE EJ 1 składają się wykłady uznanych ekspertów. Podobnie jak w przypadku konkursów tematyka wykładów będzie dotyczyć energetyki jądrowej widzianej z szerszej, niekoniecznie technicznej perspektywy. Dlatego wśród mówców znajdują się m.in. uznani socjologowie oraz eksperci z zakresu ochrony środowiska. Do końca 2013 roku odbędzie się w sumie sześć takich wykładów, zorganizowanych na uczelniach o różnym profilu i w różnych częściach kraju. - Nasz program ma charakter ogólnopolski. Chcieliśmy jednak rozpocząć go na Pomorzu, bo tu właśnie znajdują się lokalizacje, które badamy pod kątem budowy pierwszej polskiej elektrowni atomowej. Jestem przekonany, że pomorskie uczelnie będą wiodącym ośrodkiem kształcenia pracowników i naukowców zaangażowanych w realizację projektu jądrowego – powiedział prezes PGE EJ 1.

W ramach działań komunikacyjnych skierowanych do społeczności lokalnych, PGE EJ 1 organizuje także wykłady dla słuchaczy Uniwersytetów Trzeciego Wieku z województw pomorskiego i zachodniopomorskiego. Prowadzić je będą specjaliści z Narodowego Centrum Badań Jądrowych.

Partnerami projektu są: Ministerstwo Gospodarki, Narodowe Centrum Badań Jądrowych i Polskie Towarzystwo Nukleoniczne. Patroni medialni: „Forbes”, „Polityka” oraz Radio Kampus
Źródło: <http://www.swiadomiooatomie.pl/>



MAEA: Polska jest gotowa na wdrożenie energetyki jądrowej

Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej (MAEA) opublikowała Raport z przeprowadzonej w marcu misji INIR. Eksperti MAEA pozytywnie ocenili przygotowania Polski do wdrożenia Programu polskiej energetyki jądrowej (PPEJ). Autorzy raportu docenili nasz

kraj za wysokie standardy współpracy na szczeblu krajowym i międzynarodowym oraz wdrożenie nowoczesnych regulacji prawnych dotyczących energetyki jądrowej.

Raport MAEA, który pozytywnie ocenia realizację działań podejmowanych przez polski rząd wynikiem **Zintegrowanego Przeglądu Infrastruktury Jądrowej (INIR)**, Eksperti wskazali jednak na konieczność wzmacniania ram prawnych dla sektora. Ponadto podkreślili potrzebę przyjęcia przez rząd zaktualizowanego Programu Rozwoju Energetyki Jądrowej oraz opracowania zintegrowanego planu rozwoju zasobów ludzkich.

Wnikliwej analizie poddali 19 obszarów PPEJ, w tym m.in. ramy prawne polityki krajowej i zarządzania wdrożeniem PPEJ, bezpieczeństwo fizyczne i systemy zabezpieczeń, regulacje obejmujące bezpieczeństwo jądrowe i ochronę przed promieniowaniem jonizującym, rozwój zasobów ludzkich i zaplecza naukowo-badawczego oraz zaangażowanie przemysłu oraz proces zamówień i dostaw. W INIR wzięły udział kluczowe podmioty zaangażowane w realizację Programu: Ministerstwo Gospodarki, Ministerstwo Ochrony Środowiska, Generalna Dyrekcja Ochrony Środowiska, Agencja Bezpieczeństwa Wewnętrznego, Państwowa Agencja Atomistyki, Rządowe Centrum Bezpieczeństwa, Urząd Dozoru Technicznego, Zakład Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych oraz Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A. i PGE Polska Grupa Energetyczna S.A. - inwestor/operator pierwszej polskiej elektrowni jądrowej.

MAEA opracowała wytyczne (<http://www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/7812/Milestones-in-the-Development-of-a-National-Infrastructure-for-Nuclear-Power>), które pomagają krajom wdrażającym energetykę jądrową zapewnić bezpieczne, odpowiedzialne i zrównoważone wykorzystanie tej technologii. O przeprowadzenie misji INIR Polska wystąpiła w 2009 roku.

Raport dostępny jest na stronach internetowych

MAEA: http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/Infrastructure/Approved_INIR_Report_Poland.pdf

Wrzesień 2-6, 2013 in Warsaw, Poland.



2 września w gmachu Centralnej Biblioteki Rolniczej rozpoczęła się konferencja PLASMA 2013

Badania i zastosowania plazmy w różnych dziedzinach nauki i techniki rozwijane są bardzo intensywnie na całym świecie. Ważnym celem badań plazmy gorącej jest opanowanie kontrolowanej syntezy (fuzji) termojądrowej dla przyszłej produkcji energii w sposób bezpieczny dla ludności i środowiska. Plazma niskotemperaturowa znajduje różne zastosowania technologiczne, m.in. w elektronice, technice kosmicznej i modyfikacji właściwości materiałów.

W Polsce kilka ośrodków zajmuje się badaniami plazmowymi i termojądrowymi w ścisłej współpracy międzynarodowej. Są to: Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy, Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Instytut Fizyki Jądrowej PAN, Centrum Badań Kosmicznych PAN, Instytut Maszyn Przepływowych PAN, Uniwersytet Opolski, oraz kilka grup naukowych w innych uczelniach i instytutach. IFPiLM koordynuje w Polsce prace dotyczące fuzji termojądrowej w układach tokamak i stellarator w ramach programu Asocjacji EURATOM-IFPiLM i fuzji laserowej w ramach europejskiego projektu HiPER.



FAMILIARIZATION WITH CALCULATION CODES APPLICATION AND SAFETY ANALYSIS WORKSHOP

9 – 10 września, 2013 Instytut Techniki Ciepłej, Politechnika Warszawska

Politechnika Warszawska opracowała i pokazała wyniki analizy bezpieczeństwa dla trzech scenariuszy, przedstawiających awarie reaktorów jądrowych. Warsztat został zorganizowany wspólnie z AREVA, francuską firmą projektującą i budującą reaktory na całym świecie.

Politechnika Warszawska przedstawiła podejście do modelowania i obliczenia, a specjaliści z AREVA skomentowali i udzielili wskazówek czy modele zostały przygotowane zgodnie ze światowymi standardami, a analizy należycie wykonane.

Przed warsztatem odbyła się krótka sesja instruktażowa, pokazująca możliwości kodów obliczeniowych RELAP5 i MELCOR oraz środowiska ułatwiającego modelowanie SNAP.

[szczegóły na stronach www.ekoatom.com.pl](http://www.ekoatom.com.pl)

KRZYSZTOF RZYMKOWSKI

ZESTAWY KRYTYCZNE - REAKTORY DOŚWIADCZALNE

Przeznaczenie zestawów krytycznych

Pierwszy reaktor jądrowy, którego konstruktorem był Enrico Fermi został uruchomiony w grudniu 1942 w Chicago. Pierwszym na świecie reaktorem dostarczającym energię elektryczną był reaktor doświadczalny EBR-1 (*Experimental Breeder Reactor*) z paliwem plutonowym zbudowany niedaleko Idaho Falls w 1951 roku. Pierwsza elektrownia jądrowa została uruchomiona w 1954 w Obnińsku w ZSRR (*Atomic Power Station -1*)¹ z lekkowodnym reaktorem prototypowym RBMK (*Reaktor Bolszoi Moszcznosti Kanalnyj*).

Od tego czasu zaprojektowano bardzo wiele różnorodnych typów reaktorów jądrowych o różnym przeznaczeniu. Wiele rozwiązań nie spełniło początkowo oczekiwanych rezultatów jednakże, po uzyskaniu większego doświadczenia w budowie reaktorów powraca się nawet do zaniechanych koncepcji.

Przykładem mogą być np. reaktory na stopionych solach (*MSR Molten Salt Reactor*) [10] czy reaktory ze złożem usypanym (*PBR Pebble Bed Reactor*), których prototypy powstały już w początkowym okresie rozwijania technik jądrowych (przy budowie pierwszych bomb jądrowych), mimo, że spodziewane wyniki prowadzonych obecnie w tym kierunku prac eksperymentalnych są odległe.

W opracowywaniu nowych rozwiązań technologicznych pozwalających na sprawdzenie założeń teoretycznych, modeli matematycznych odwzorowujących pracę reaktora oraz weryfikację przewidywanych i związanych z nią charakterystyk zachodzących innych procesów, pomaga zastosowanie specjalnych reaktorów doświadczalnych tzw. zestawów krytycznych. Przeprowadzenie testów sprawdzających w zestawach krytycznych odbywa się w warunkach odtwarzających konstrukcję projektowanego reaktora z możliwością szybkiej modyfikacji konstrukcji i powtórzenia testów w nowej konfiguracji.

Zestawy krytyczne - reaktory doświadczalne posiadają wystarczającą ilość materiału jądrowego i moderatora by uzyskać stabilną podtrzymującą się reakcję łańcuchową na niskim poziomie mocy.

Warunkiem samopodtrzymującej się, stabilnej i kontrolowanej reakcji łańcuchowej rozszczepienia jest by liczba neutronów powstających i pochłanianych w materiale jądrowym była jednakowa, czyli by współczynnik mnożenia $k_{ef} = 1$ (stosunek liczby neutronów w danym pokoleniu do liczby neutronów w pokoleniu poprzednim). Przeprowadzane są także eksperymenty w stanie podkrytycznym, gdy $k_{ef} < 1$. Zestawy krytyczne nazywane są popularnie reaktorami o mocy zerowej. Zestawy krytyczne wykorzystywane do symulacji pracy rdzenia projektowanego typu reaktora są konstruowane w taki sposób by sprawdzić wiele wariantów projektu reaktora. W tym celu materiał jądrowy jest składany z pojedynczych elementów pozwalających na tworzenie różnych zestawów paliwowych przy zapewnieniu możliwości szybkiej zmiany jego składu i konfiguracji.

W zestawach krytycznych przeprowadzane były najczęściej eksperymenty określające masę krytyczną, pomiar współczynnika Dopplera, pomiar współczynnika reaktywności próżni (*void*

¹ pierwsza elektrownia w Obnińsku nosiła nazwę "Pierwsza na świecie" ("Первая в мире")

coefficient), odwzorowanie (rozkład przestrzenny) strumienia neutronów, pomiar energii neutronów.

Wyznaczenie masy krytycznej pozwala zweryfikować wpływ materiałów używanych w rdzeniu na reaktywność reaktora. Reaktywność reaktora zależy od przekroju czynnego jak również od zmian energii widma energetycznego strumienia neutronów i jego rozkładu przestrzennego.

Efekt Dopplera ma bardzo istotny wpływ na reaktywność reaktora, szczególnie przy zmianach temperatury zwłaszcza w reaktorach prędkich powielających i jego sprawdzenie jest niezbędne dla zapewnienia bezpieczeństwa pracy projektowanego typu reaktora.

Pomiaru rozkładu strumienia neutronów i jego widma energetycznego dokonuje się przez aktywację małych próbek (z folii) różnych materiałów o znanym przekroju czynnym umieszczanych w różnych punktach rdzenia. Podobnie wyznacza się trajektorie neutronów. Pozwala to na lepsze poznanie charakterystyk strumienia neutronów.

Wszystkie te doświadczenie prowadzone są przy wykorzystaniu zestawów krytycznych przy bardzo niewielkiej mocy, zwykle poniżej 20 kW [1]. Zbyt duża moc powoduje wypalenie materiału jądrowego zakłócając wyniki doświadczeń i powodując konieczność używania zdalnie sterowanych manipulatorów oraz stosowanie osłon, co dodatkowo utrudnia szybką zmianę konfiguracji rdzenia. W większości używanych zestawów krytycznych, ze względu na małą moc nie stosuje się specjalnych systemów chłodzenia.

Ze względu na to, że w zestawach krytycznych używane są materiały jądrowe najczęściej w postaci metalicznej i o wysokim wzbogaceniu (uran 45% -90%, Pu), które dość szybko i łatwo mogą być wykorzystane do celów militarnych, konieczne jest stosowanie odpowiednich zabezpieczeń obiektu. Obecnie na świecie wykorzystywanych jest około 60 zestawów krytycznych. Ilość pracujących zestawów jest zmienna, ponieważ po przeprowadzeniu podstawowych pomiarów niezbędnych do zaprojektowania określonego typu reaktora i wykonaniu innych dodatkowych doświadczeń są one likwidowane. Nowsze wersje zestawów krytycznych są dostosowane do nowych wymagań.

Klasyfikacja zestawów krytycznych

Przy klasyfikowaniu zestawów krytycznych mogą być uwzględniane różne ich cechy w zależności od celu w jakim taka klasyfikacja jest przeprowadzana. Zwykle uwzględniane są dwa podstawowe elementy: sposób umieszczania materiału jądrowego w zestawie lub rodzaj typu reaktora, którego pracę ma naśladować zestaw (symulacja pracy reaktorów termicznych, prędkich itd.). Dla celów ochrony i kontroli materiałów jądrowych przyjęto w MAEA (Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej) klasyfikację uwzględniającą sposób umieszczania materiału jądrowego w zestawie [1]. Pozwala to na łatwiejszą kontrolę ilości używanego materiału jądrowego bez wnikania w subtelności jego wykorzystania do celów badawczych.

Materiał jądrowy w zestawach krytycznych umieszczany jest w kasetach (pojemnikach, szufladach – kanałach) ustawianych pionowo lub poziomo. Pionowe ustawienie pojemników (*vertical integral*) umożliwia odtworzenie konstrukcji większości używanych obecnie reaktorów łącznie ze sposobem załadowywania reaktora przy pomocy ładowarek – maszyn załadowniczych (*loading machine*).

W zestawach krytycznych pionowych (*vertical*) kasety - pojemniki z materiałem jądrowym są ustawiane pionowo. Zawierają one wszystkie elementy materiałowe, które znajdują się w kasetach modelowanego reaktora energetycznego, w konfiguracji zapewniającej pełną symulację przepływu strumienia neutronów. Materiał jądrowy umieszczany w kasetach (o różnych przekrojach) jest

wykonany w postaci cienkich płytek umożliwiając tworzenie różnych wariantów składu paliwa. Przekroje kaset są różne (kwadratowe, kołowe, sześciokątne itp.) zależne od typu symulowanego przez zestaw krytyczny reaktora.

W zestawach krytycznych poziomych - horyzontalnych (*horizontal split bed*) kasety z materiałem jądrowym, wykonane w postaci szuflad (wsuwanych do poziomych kanałów), umieszczane są w poziomych komorach rdzenia zestawu krytycznego. Rdzeń takiego reaktora składa się zwykle z dwóch części stałej i ruchomej. Po ich rozsunięciu, możliwe jest załadowanie materiału jądrowego w szufladach wsuwanych poziomo do kanałów rdzenia. Reaktor może pracować tylko w czasie, gdy obie części dolegają do siebie. Zwiększa to bezpieczeństwo pracy podczas zmiany konfiguracji rdzenia.

Oczywiście reaktywność w obu rozwiązaniach zestawów jest kontrolowana przez pręty regulacyjne o konstrukcji odpowiednio dopasowanej do rodzaju zestawu krytycznego (pionowej lub horyzontalnej).

Drugim elementem klasyfikacji zestawów krytycznych jest rodzaj symulowanego reaktora. Początkowo zestawy krytyczne były głównie używane do badania reakcji jądrowych zachodzących w rdzeniach reaktorów prędkich. Były to konstrukcje zarówno o orientacji pionowej jak i horyzontalnej. Zaprojektowano również zestawy krytyczne do badania zjawisk w rdzeniach reaktorów termicznych, co jest zadaniem trudniejszym ze względu na różnicę średnich dróg swobodnych neutronów termicznych i neutronów szybkich. Łatwiej jest zbudować strukturę naśladującą rzeczywisty rdzeń reaktora szybkiego nawet z uwzględnieniem warunków chłodzenia[1].

Konstrukcje zestawów krytycznych

Wszystkie państwa o rozwiniętej energetyce jądrowe prowadzą rozległe badania zjawisk zachodzących w rdzeniach projektowanych reaktorów. Celem badań jest poprawa wykorzystania paliwa jądrowego.

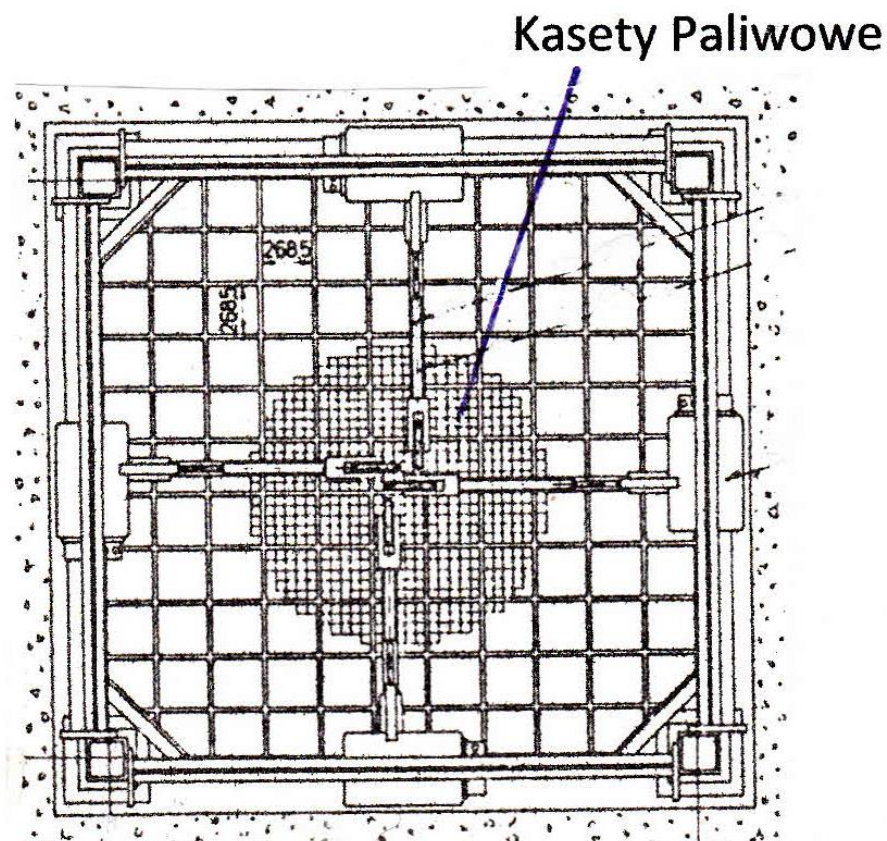
Zestawy krytyczne o konstrukcji pionowej (*vertical integral*)

Do najciekawszych i jednocześnie największych zestawów krytycznych, o tej konstrukcji, należały zestawy przeznaczone do badań **reaktorów prędkich**: Zerowej Mocy Reaktorowy Zestaw Powielający ZEBRA (*Zero Energy Breeder Reactor Assembly*) [Winfrith UK Atomic Energy Authority[11]] oraz Prędkiej Zerowej Mocy Zestaw Krytyczny SNEAK (*Schnell Null Energie Anordnung Karlsruhe*).

Zestaw ZEBRA uruchomiony w 1962 roku był wykorzystywany do 1982 roku. Wyniki badań wykorzystano między innymi przy budowie prototypowego reaktora powielającego MONJU w Japonii i reaktorze EFR (*European Fast Reactor*).

Objętość rdzenia zestawu ZEBRA wynosiła około 9 m^3 (sześcian o boku 3 m). Rdzeń był otoczony reflektorami neutronów i szerokim płaszczem ochronnym z uranu naturalnego. W zależności od użytej konfiguracji używano od 15 do 65 ton uranu. W reaktorze, w każdym pionowym kanale (siatki 11x11 kanałów), można było umieścić pionowo 25 stalowych kaset paliwowych długości 3 m, w których znajdował się materiał jądrowy (U^{235} , Pu^{239} , Pu^{241}) w postaci płytek o powierzchni $5,06 \text{ cm}^2$ i grubości od 1,55 mm do 3,1 mm.

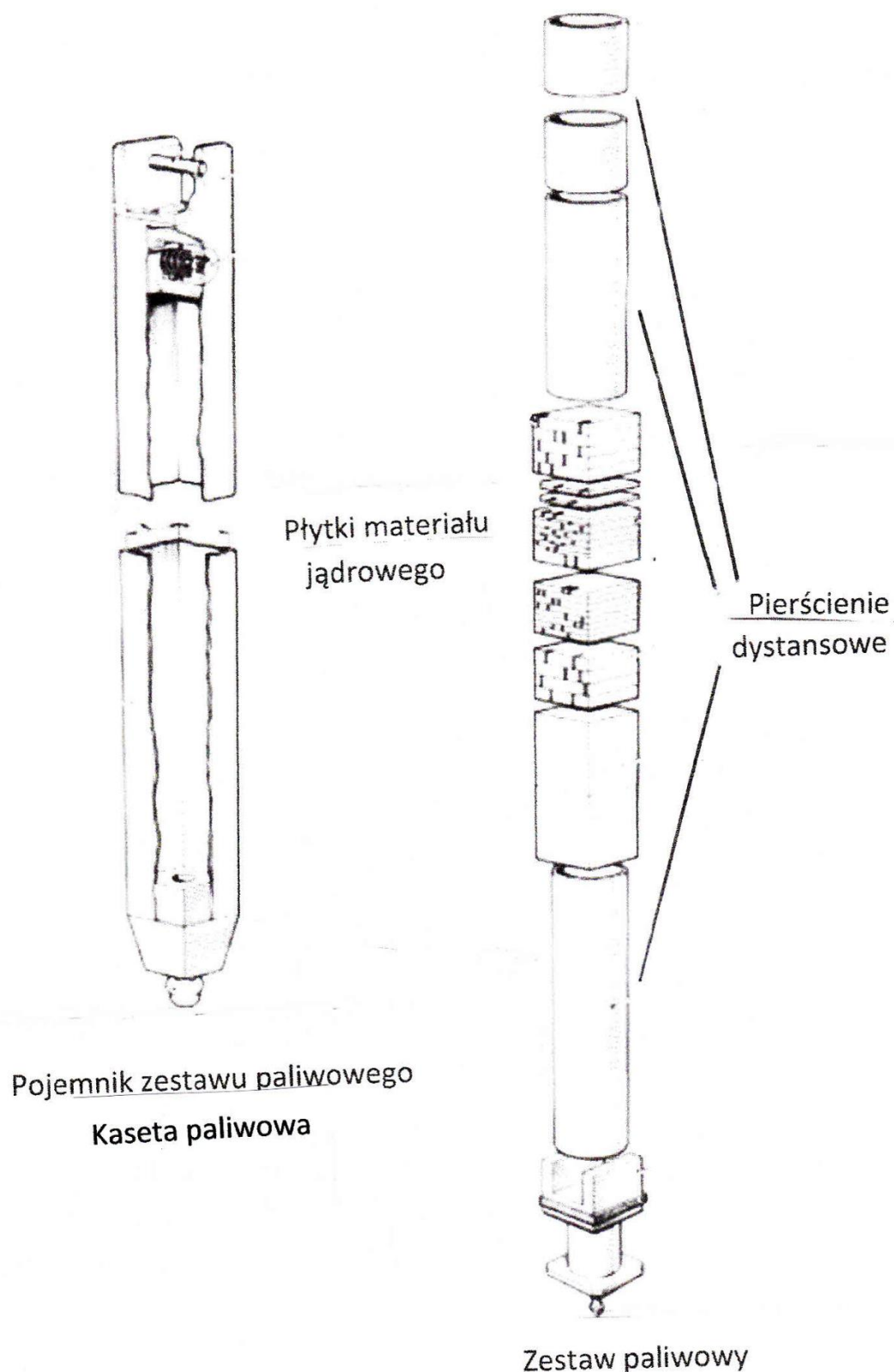
Na rys. 1 przedstawiono przekrój poprzeczny rdzenia zestawu ZEBRA, a na rys. 2 przedstawiono konstrukcję kasety paliwowej.



Przekrój rdzenia zestawu krytycznego ZEBRA

Rysunek 1 Przekrój rdzenia zestawu krytycznego ZEBRA

W początkowych eksperymentach używano około 350 kg uranu o wzbogaceniu 93% 150 kg uranu o wzbogaceniu 37,5 % oraz 100 kg plutonu. Wykorzystanie pojedynczych płytek materiału jądrowego pozwala na modelowanie różnych kompozycji składu paliwa. Płytki plutonu były pokryte miedzią. Jak widać materiał jądrowy załadowany do rdzenia nadawał się prawie natychmiast do budowy broni jądrowej. Na rys. 3 przedstawiono zestaw krytyczny ZEBRA. Maksymalna moc reaktora wynosiła 100 W i nie było potrzebne dodatkowe chłodzenie.

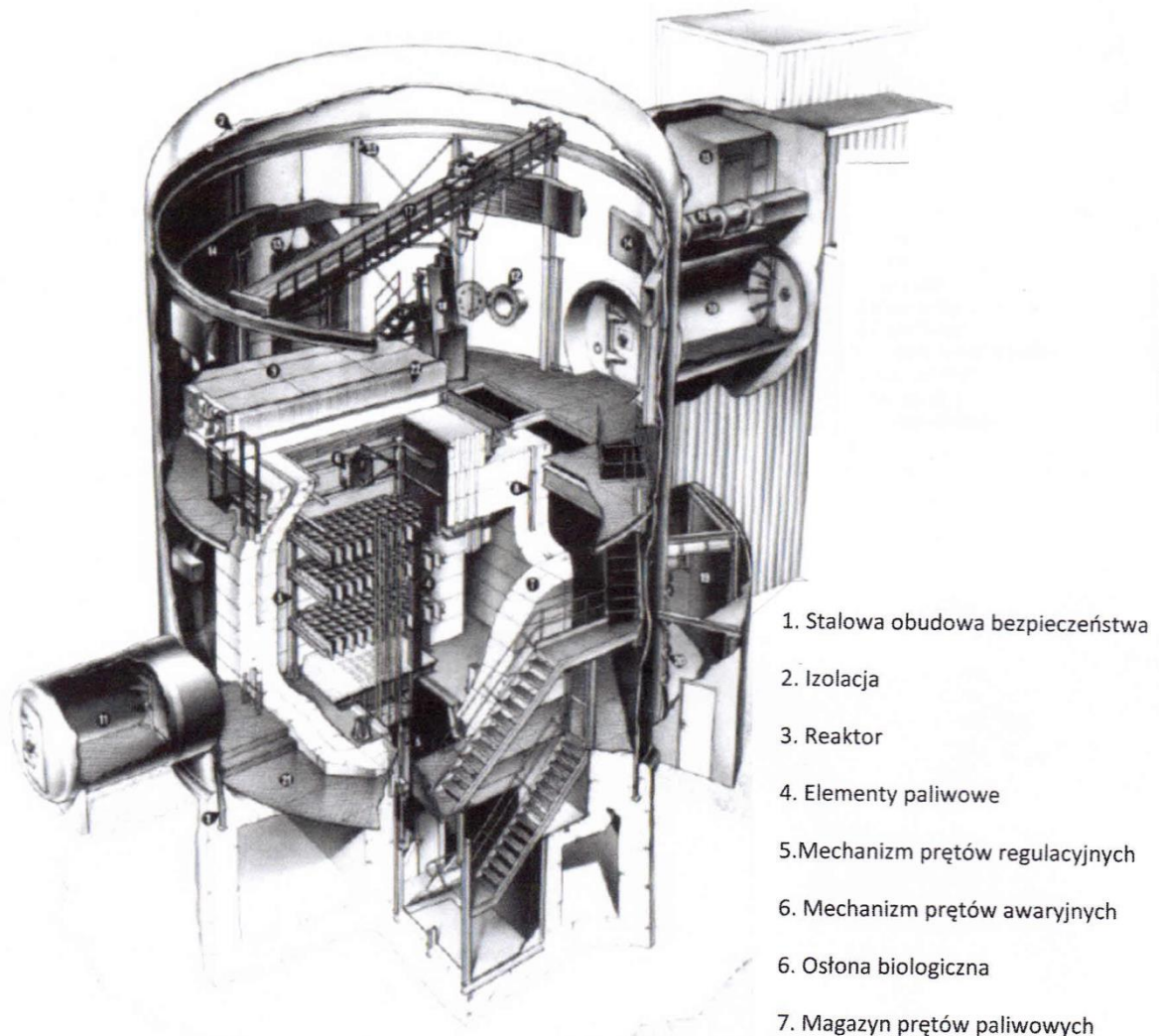


Rysunek 2 Konstrukcja kasety paliwowej zestawu krytycznego ZEBRA

Zestaw SNEAK uruchomiony w 1966 roku był wykorzystywany do 1982 roku. Objętość rdzenia zestawu krytycznego SNEAK (podstawa ośmiokąta o przekątnej 3, 2 m i wysokości

ELEKTROWNIE JĄDROWE

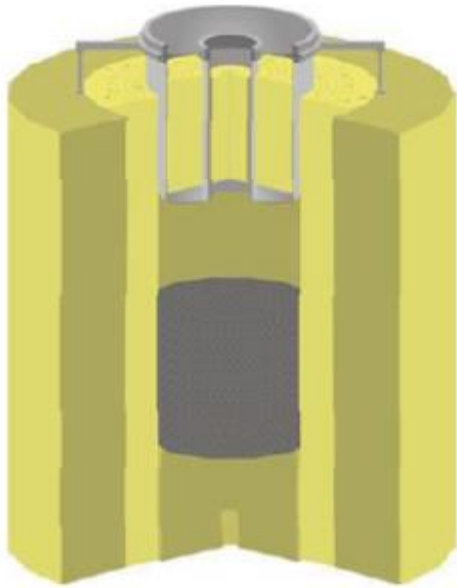
2, 7 m) była podobna do objętości zestawu ZEBRA. W centralnej części rdzenia umieszczano materiał jądrowy w stalowych kasetach w postaci płytek i bloków uranu metalicznego o wzbogaceniu 20 % i 35 % pokrytych warstwą niklu i płytek PuO_2 - UO_2 chronionych cienką warstwą stalową. Skład materiału zależał od przeprowadzanego eksperymentu. Moc reaktora nie przekraczała 1 kW.



Rysunek 3 Zestaw krytyczny ZEBRA

Innymi nietypowymi rozwiązaniami zestawów krytycznych, o konstrukcji pionowej (vertical integral) są: przeznaczony do badań reaktorów termicznych zestaw krytyczny PROTEUS (Szwajcaria) uruchomiony w 1990 roku oraz Deuterowy Zestaw Krytyczny DCA (Deuterium Critical Assembly) pracujący w Japonii w latach 1969 – 2001, w którym moderatorem była ciężka woda.

Charakterystyczną cechą nowego rozwiązania zestawu krytycznego PROTEUS powstałego w Szwajcarii są dwa obszary cylindrycznego rdzenia. Na rys. 4 przedstawiono przekrój rdzenia zastawu PROTEUS. Obszar zewnętrzny rdzenia o średnicy 1, 8 m i wysokości 2 m zawiera pastylki uranowe o wzbogaceniu 5% pokryte aluminium i zatopione w moderatorze grafitowym pełniącym jednocześnie rolę reflektora. Wewnątrz rdzenia znajduje się cylindryczna wnęka o średnicy 1, 2 m i wysokości 1,57 m stanowiąca obszar do przeprowadzania badań. Materiał jądrowy może być w dowolnej postaci zależnej od przeprowadzanego eksperymentu i dowolnym składzie. Początkowo obszar komory doświadczalnej przystosowano do doświadczeń, w których moderatorem miała być



Rysunek 4 Przekrój rdzenia zestawu krytycznego PROTEUS

moderatorem jest ciężka woda a chłodzone są lekką wodą. Paliwem był nisko wzbogacony dwutlenek uranu UO_2 i $PuO_2 - UO_2$ w postaci pastylek umieszczanych w aluminiowych lub cyrkonowych rurach montowanych w zestawy kasetowe. Używano też kaset zawierających nisko wzbogacony uran metaliczny. Ze względu na trudności w manewrowaniu paliwem ilość eksperymentów była ograniczona mimo atrakcyjności składu paliwa tzw. MOX (mieszanina tlenków uranu i plutonu). Prowadzenie tych eksperymentów było powiązane z planowanym zastąpieniem paliwa uranowego wykorzystywanego w reaktorach energetycznych paliwem MOX.

Zestawy krytyczne o konstrukcji horyzontalnej (*horizontal split bed*)



Rysunek 5 Zestaw krytyczny ZPPR

materialu jądrowym wsuwane w kanały reaktora poziomo w każdą z części (ruchomą i nieruchomą) rdzenia mają długość 67 cm każda. Na rys. 7 przedstawiono część nieruchomą rdzenia zestawu FCA. Długość zestawu paliwowego wynosi 1, 34 m. Stan krytyczny można osiągnąć w bardzo szerokim zakresie zmieniając wymiary krytyczne reaktora. Masa krytyczna reaktora może

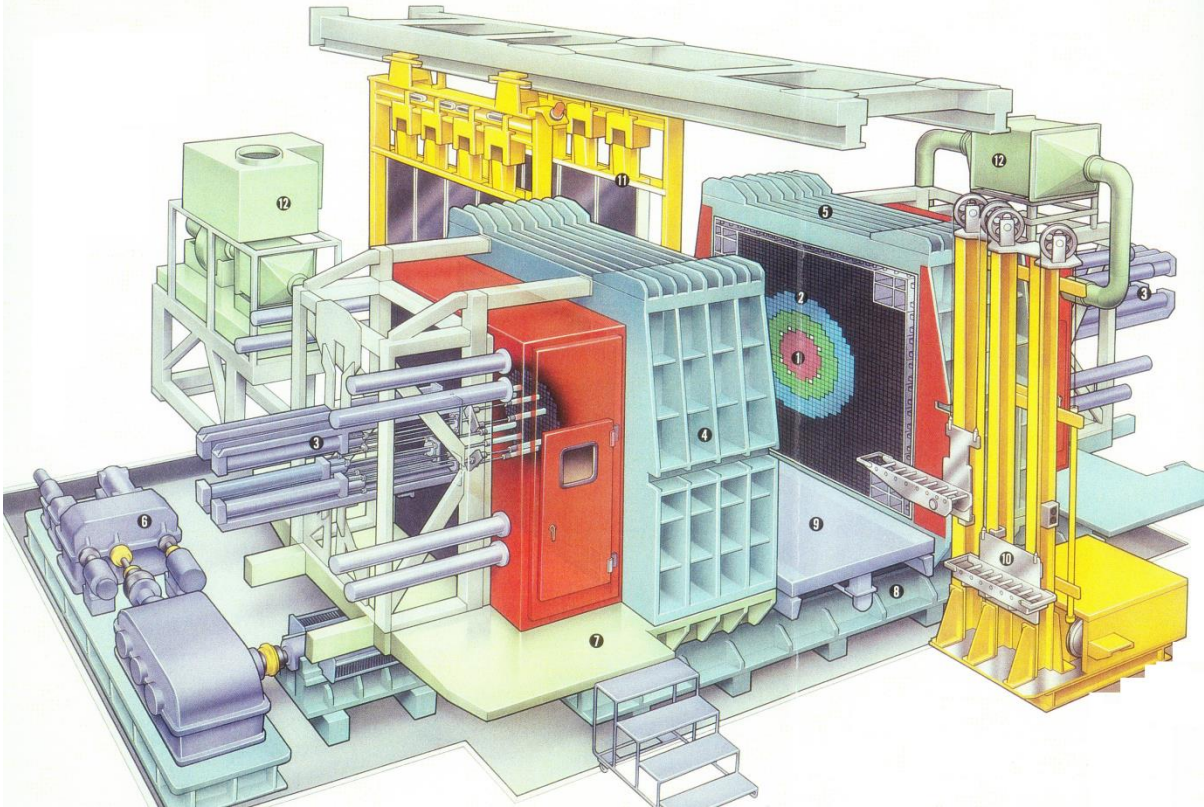
ciężka woda. W kolejnych doświadczeniach używano innych moderatorów. Przez większość czasu PROTEUS był wykorzystywany do symulacji procesów zachodzących w reaktorach LWR, ale jego konstrukcja pozwoliła na wykorzystywanie go do symulacji zjawisk zachodzących w reaktorach prędkich. Właściwości zewnętrznego obszaru rdzenia umożliwiają osiągnięcie stanu krytycznego bez wymagania wprowadzenia pełnej masy krytycznej testowanego materiału. Maksymalna moc reaktora wnosi 1 kW. W ostatnich doświadczeniach zestaw krytyczny był wykorzystywany do testowania reaktorów ze złożem usypanym pebble bed, w których paliwo stanowią kule, np. ceramiczno uranowe.

Zestaw krytyczny DCA przypominała swoją konstrukcją rozwiązania stosowane w bardziej zaawansowanych reaktorach termicznych, w którym

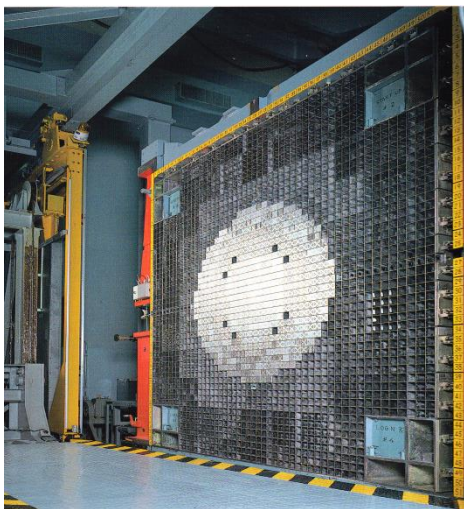
Do najciekawszych i jednocześnie największych zestawów krytycznych, o tej konstrukcji, należały zestawy przeznaczone do badań reaktorów prędkich rodziny Reaktorów Mocy Zerowej ZPR (*Zero Power Reactor*) opracowane w Stanach Zjednoczonych. Powstało ich kilka z których ZPR3 był najstarszy. ZPR 6 używany był w latach 1963-1982, ZPR 9 używany był w latach 1964 – 1981 a największy z tej serii ZPPR (*Zero Power Plutonium Reactor*) używany w latach 1969 - 1990. Na rys.5 przedstawiono widok części nieruchomej zestawu ZPPR.

Obecnie największym używanym zestawem krytycznym tego typu jest Prędkie Zestaw Krytyczny FCA (*Fast Critical Assembly*) skonstruowany w Japonii. Na rys. 6 przedstawiono zestaw krytyczny FCA. Szuflady z

zmieniać się w zakresie od 40 do 250 kg plutonu lub od 40 do 550 kg U^{235} . Materiał jądrowy jest



Rysunek 6 Zestaw krytyczny FCA 1. Rdzeń 2. Osłona 3. Pręty regulacyjne i mechanizm sterujący 4. Ruchoma część rdzenia 5. Nieruchoma część rdzenia

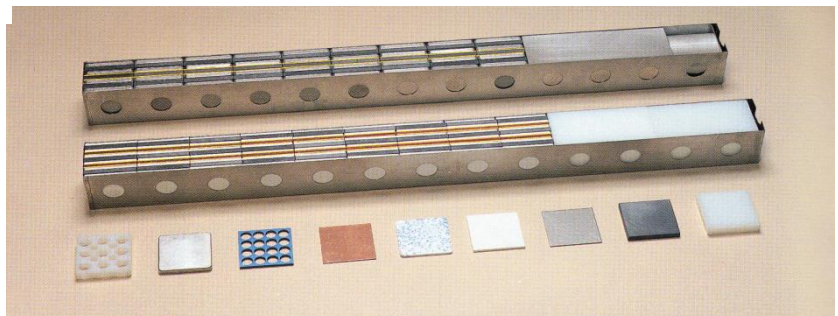


Rysunek 7 Część nieruchoma rdzenia zestawu FCA

eksperymenty potrzebne do konstrukcji dużych reaktorów powielających z jednorodnym i niejednorodnym rdzeniem, eksperymenty sprawdzające bezpieczeństwo jądrowe reaktorów prędkich,

wykonany w postaci płytek, prostopadłościennych bloków i szpilek paliwowych. Płytki mają bardzo zróżnicowane wymiary 2x1 cala, 2x2 cale, 2x4 cale i posiadają różną grubość 1/8 cal i 1/16 cala. Bloki mają wymiary 2x2x4 cale. Używane w reaktorze materiały jądrowe mają różne wzbogacenie od poniżej 20 % do 90%. W doświadczeniach wykorzystuje się również uran zubożony i naturalny. Szufłady materiałowe nie muszą być całkowicie wypełnione. Na rys. 8 przedstawiono szufładę i płytki materiału jądrowego używane w zestawie FCA. Moc reaktora nie przekracza 2 kW.

Zestaw był używany do pomiaru charakterystyk prędkich reaktorów powielających np. symulowano przebiegi spodziewane w reaktorach JOYO i MONJU, przeprowadzano



Rysunek 8 Szufłada wsuwana do kanałów rdzenia i płytki materiału jądrowego

przeprowadzano eksperymenty różnych kompozycji paliwa dla prędkich reaktorów powielających. Ze względu na ogromną elastyczność zmian konfiguracji zestaw jest używany do nowych eksperymentów np. do kompleksowych badań transuranowców.

Do najciekawszych i bardzo oryginalnych rozwiązań należy zestaw krytyczny zaprojektowany, zbudowany w uniwersytecie Kioto zestaw KUCA (*Kyoto University Critical Assembly*). Zestaw krytyczna KUCA został uruchomiony w 1974 i jest dotychczas intensywnie wykorzystywany wspólnie przez wszystkie japońskie uniwersytety. Oryginalność konstrukcji polega na umieszczeniu w jednej obudowie trzech niezależnych różnych rdzeni (A, B, C).

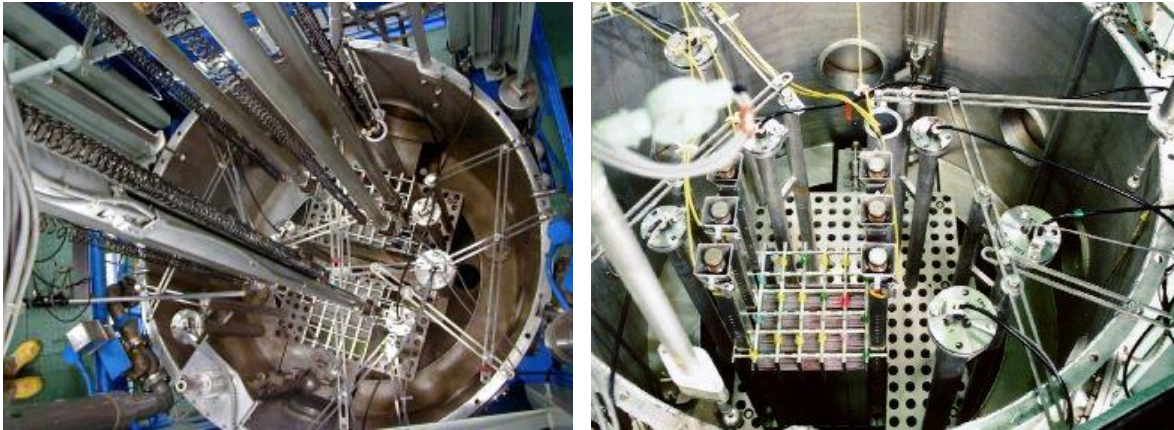
Zestaw, jest przeznaczony do badań zjawisk fizycznych zachodzących w reaktorach i jest wykorzystywany, jako narzędzie pomocnicze do ich projektowania. Nie jest wykorzystywany do symulacji pracy reaktora. Najważniejsze badania przeprowadzone dotychczas przy użyciu zastawu dotyczyły badania zjawisk zachodzących w reaktorach wykorzystujących, jako paliwo tor, badanie zjawisk związanych z transmutacją pierwiastków, badanie stanów podkrytycznych przy użyciu różnych technik, zbadanie charakterystyk systemu sprzężonych rdzeni ze szczególnym określeniem charakterystyki separacji, która jest wskaźnikiem stabilności rdzenia, opracowanie nowych technik pomiarowych neutronów, symulacji eksperymentów ADS (*Accelerator Driven System*) polegające na uzyskaniu rozszczepienia jąder transuranowców w stanie podkrytycznym reaktora wykorzystując dodatkowe źródło neutronów. Podobne badanie prowadzone są w innych ośrodkach wykorzystujących reaktory ADR (*Accelerator Driven Reactor*). Celem badań jest uzupełnienie cyklu paliwowego, aby poprzez rozszczepienie długożyciowych (rzędu milionów lat) izotopów pierwiastków ciężkich znajdujących się w wypalonym paliwie uzyskać izotopy krótko żyjące (rzędu setek lat) zmniejszając ilość odpadów. Wypalane tą metodą pierwiastki ciężkie wykorzystywane byłyby do produkcji energii.

Zestaw krytyczny wykorzystywany jest również do celów dydaktycznych np. wyznaczanie masy krytycznej, kalibracja prętów regulacyjnych pomiaru strumienia neutronów termicznych, sterowanie pracą reaktora. Program edukacyjny nie ogranicza tylko do uniwersytetów japońskich i jest wykorzystywany przez ośrodki zagranicznie chińskie, koreańskie i szwedzkie. Moderatorem w rdzeniach A i B tego zestawu jest polietylen i grafit.



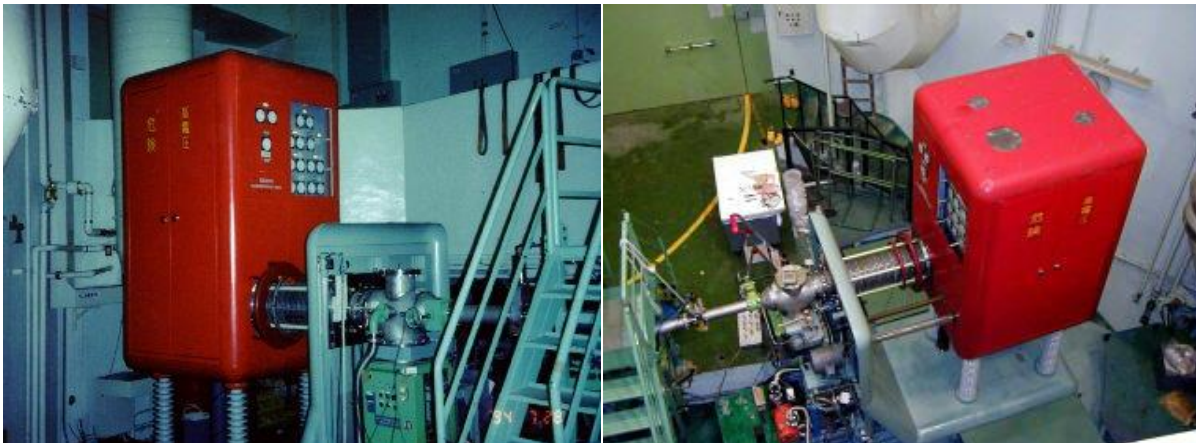
Rysunek 9 Rdzeń A (podobnie zbudowany jest rdzeń B) zestaw krytyczny KUCA

Na rys. 9 przedstawiono rdzeń A. Podobną konstrukcję ma rdzeń B. Reaktor A może być wspomagany zewnętrznym źródłem neutronów. W rdzeniu C moderatorem jest woda. Na rys. 10 przedstawiono rdzeń C zestawu KUCA. W reaktorach A i B wykorzystywany jest materiał jądrowy (uran o wzbogaceniu 93%) w postaci płytek o wymiarach 2x2x 1/16 cala pokrytych cienką warstwą polietylenu. Płytki umieszczane są w pionowych pojemnikach.



Rysunek 10 Rdzeń C zestawu KUCA z moderatorem wodnym

W rdzeniu C używany jest materiał jądrowy (uran o różnym wzbogaceniu 45 % lub 90 %) w postaci płaskich płytek 60x600x1, 5 mm pokrytych warstwą aluminium oraz płytek wygiętych (różne łuki) o długości 650 mm. Tego typu konstrukcja rdzeni umożliwia budowanie bardzo różnorodnych konfiguracji i przeprowadzanie złożonych eksperymentów. Uzupełnieniem zestawu doświadczalnego jest Impulsowy Generator Neutronów powiązany z rdzeniem A. Wiązka jonów przyspieszana w akceleratorze (300 keV Cockroft-Walton) wybija z tarczy trytywowej neutrony. Urządzenie może być wykorzystywane niezależnie w innych eksperymentach.



Rysunek 11 Akcelerator (300 keV Cockroft-Walton)

Na rys. 11 przedstawiono akcelerator używany w eksperymentach KUCA. Na rys. 12 przedstawiono elementy paliwowe wykorzystywane w zestawie KUCA.

Maksymalna moc wytwarzana w zestawie krytycznym wynosi 1 kW. Ze względu na bezpieczeństwo tylko jeden rdzeń może w danej chwili osiągnąć stan krytyczny. W początkowych, bardzo dynamicznie prowadzonych pracach budowania polskiej atomistyki oprócz uruchomienia pierwszego w Polsce reaktora (1958) EWA (Eksperymentalny Wodny Atomowy) konstrukcji rosyjskiej powstały również ambitne konstrukcje polskich reaktorów badawczych. Jednym z bardziej

udanych był zestaw krytyczny ANNA uruchomiony w 1963 roku w Świerku o mocy 100 W. W początkowej wersji miał symulować pracę nowego doświadczalnego reaktora zastępującego reaktor EWA. Zestaw ANNA był wykorzystywany do badań neutronów prędkich.



Rysunek 7 Paliwo wykorzystywane w rdzeniach zestawu KUCA

Obecnie jedynym pracującym w Polsce reaktorem jądrowym jest MARIA [13].

Jak już wspomniano charakterystyczną cechą zestawów krytycznych jest zgromadzenie w nich dużej ilości materiałów jądrowych. W związku z tym mogą one stanowić obiekt zainteresowania organizacji terrorystycznych. Dlatego ogromne znaczenie dla ochrony używanych materiałów przed użyciem ich do innych celów ma ochrona fizyczna obiektu. Drugim ważnym elementem ochrony jest częsta inwentaryzacja. Pewnym ułatwieniem jest prawie zupełny brak przetransportowywania tych materiałów jak to ma miejsce w reaktorach energetycznych - transporty świeżego i wypalonego paliwa wymagające rozbudowanej kontroli i ochrony. Przemieszczenie paliwa dokonywane jest na terenie jednego obiektu najczęściej ograniczone do jednego budynku. Transport materiałów pomiędzy ośrodkami badawczymi należy do rzadkości ze względu na różnorodność konstrukcji zestawów krytycznych. W doświadczeniach wykorzystywane są bardzo małe poziomy mocy. Uważa się, że paliwo nie ulega wypaleniu i jest traktowane, jako paliwo świeże, co bardzo upraszcza pracę przy zmianach konfiguracji rdzenia dla różnych eksperymentów, zmniejsza ryzyko napromieniowania personelu, ułatwia składowanie. Przy składowaniu materiał jądrowy przechowywany jest w niewielkich pojemnikach oddalonych od siebie tak by ich wzajemne oddziaływanie było jak najmniejsze. Czasem (w przypadku plutonu) stosowane jest dodatkowe chłodzenie. Należy zwrócić również uwagę na fakt, że praca zestawu jest ściśle zaplanowana i posiada on rozbudowany system kontroli reaktywności.

Zestawy są niezwykle użytecznym narzędziem przy projektowaniu reaktorów, badaniu zjawisk fizycznych, badaniach materiałowych i mogą być doskonałym narzędziem dydaktycznym.

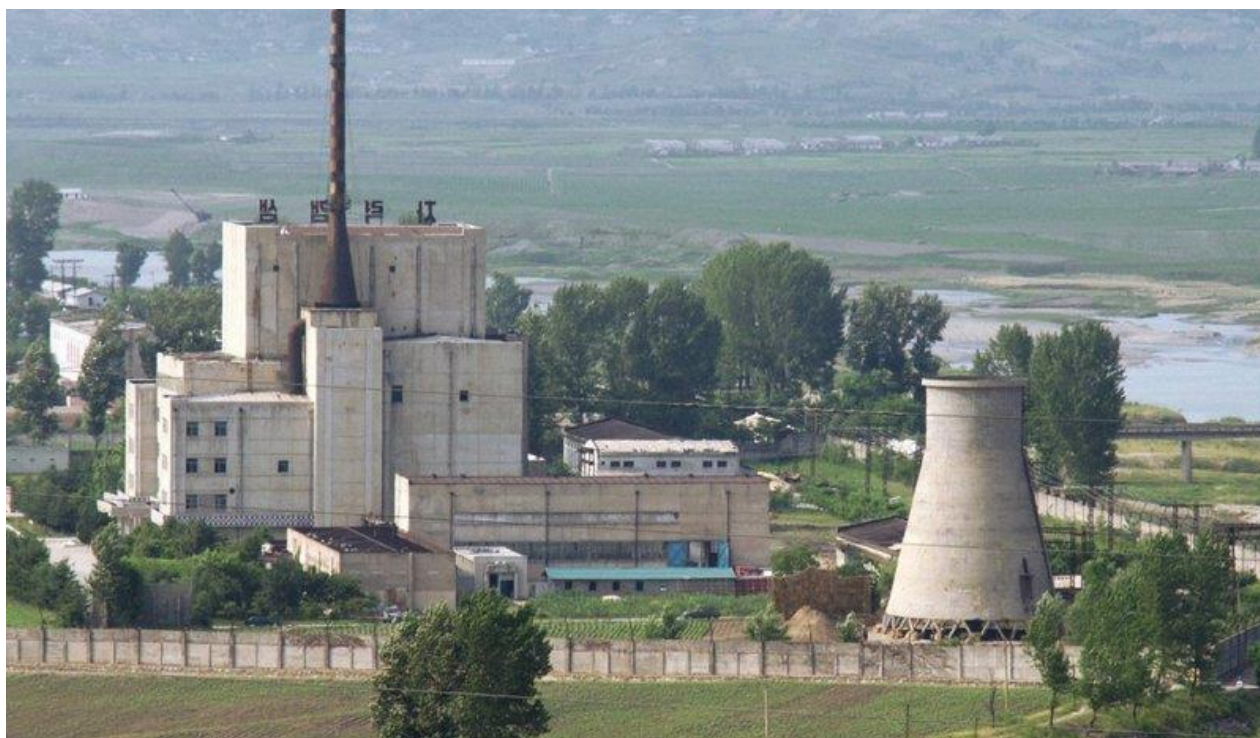
Literatura:

1. G.W. Dixon, *Critical Assembly Facility Characterization* IAEA Vienna 1985
2. M. Kielkiewicz, *Teoria reaktorów jądrowych*, PWN Warszawa 1987
3. *FCA Bulletin* Department of Nuclear Energy System JAERI Tokai 1998
4. ZPPR, the Zero Power Plutonium Reactor www.flickr.com/photos/argonne/5818312199/
5. Hans D. Gouger, *Results of Simulation of HTR – PROTEUS* FY-10 report July 2010
6. KUCA critical experiments www.science.gov/kuca+critical+experiments.ht
7. KUCA critical experiments: Topics by WorldWidescience.org
8. Kyoto Critical Assembly www.rri.kyoto-u.ac.jp/en/facilities.ca
9. Keiseke Okamura, *Introduction of SRAC for nuclear physics Analyses*, Inst AERE, Bangladesh 2007
10. S.Kilim *Reaktory na stopionych solach- ogromne możliwości ale dużo jeszcze do zrobienia*, EKOATOM Nr. 7/4 grudzień 2012, Warszawa www.ekoatom.com.pl

11. The ZEBRA Fast Critical Assembly Facility, the zero energy breeder..
412608876.websitehome.co.uk/.../zebra/ZEBRA
12. K. Fornalski, *Reaktory Jądrowe* Wydział Fizyki PW 2006
13. G. Krzysztozek, *Reaktor Badawczy MARIA – stan techniczny i wykorzystanie*, Nr. 9/4 Czerwiec 2013, Warszawa www.ekoatom.com.pl

Zdjęcia satelitarne wskazują, że Korea Północna ponownie uruchomiła reaktor w swym ośrodku nuklearnym w Jongbion - informują amerykańscy eksperci. Na zdjęciach satelitarnych z 31 sierpnia widać biały dym wydostający się z budynku w pobliżu reaktora, w którym znajdują się turbiny parowe i generatory elektryczne.

"Wydaje się, że reaktor znowu jest czynny" - napisali naukowcy na stronie internetowej uniwersytetu Johnsa Hopkinsa w Baltimore w stanie Maryland. Według ekspertów, w ośrodku w Jongbion Korea Północna może wyprodukować do sześciu kilogramów plutonu, który może być wykorzystany do budowy broni atomowej.



STANISŁAW KILIM

TRUCIZNY REAKTOROWE

Wstęp

Trucizny reaktorowe są to substancje silnie pochłaniające neutrony. Substancje takie występują w przyrodzie, ale produkowane są także w reaktorze w procesie rozszczepienia jąder paliwa, np. uranu. Część z nich powstaje bezpośrednio w procesie rozszczepienia, jako tzw. produkty rozszczepienia a część pośrednio, w procesie przemian radiacyjnych jednych produktów w drugie. Przemiany te nie następują natychmiast tylko z pewnym opóźnieniem, więc i wpływ tych trucizn na reaktor zauważalny jest także z pewnym opóźnieniem. W trakcie pracy reaktora zakłócają tzw. bilans neutronów, czyli równowagę między produkcją a stratami neutronów. Absorpcja neutronów przez trucizny powiększa straty i w końcu doprowadza do zagaszenia reaktora. Trujący izotop po pochłonięciu neutronu przestaje być trujący, więc mówi się, że trucizna się wypala. Produkcja i wypalanie trucizn konkurują ze sobą, ale po pewnym czasie ustala się między nimi równowaga i poziom zatrucia (ilość trucizn) ustala się. Najsilniejszymi truciznami wśród produktów rozszczepienia są Xe-135 i Sm-149.

Jest jeszcze jedna klasa trucizn wprowadzana przez człowieka do reaktora z zewnątrz i wykorzystywana do sterowania pracą reaktora. Używa się je, jako materiał wypełniający pręty regulacyjne, pręty bezpieczeństwa, dodatek do moderatora, dodatek do paliwa.

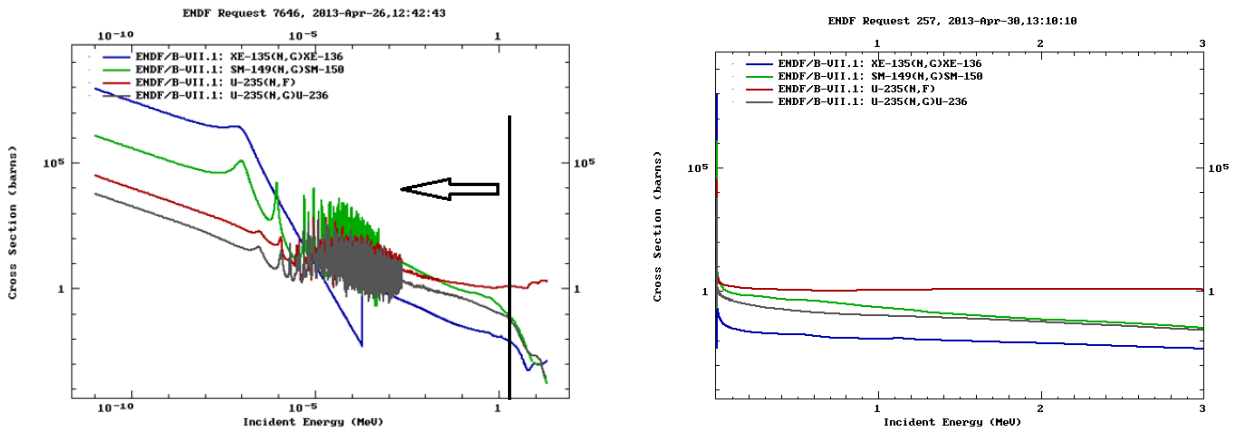
Wpływ trucizn – Xe-135 i Sm-149 na bilans neutronów w reaktorze termicznym

Bardziej szczegółowe omówienie bilansu można znaleźć na przykład w [1]. Dla potrzeb tego artykułu ograniczę się tylko do podstaw. Bilans neutronów jest to zestawienie produkcji neutronów i strat. Około 99.4% neutronów powstaje w wyniku rozszczepienia jąder. Rozszczepienie jądra następuje na skutek pochłonięcia neutronu przez jądro paliwa. W jego wyniku powstają ponad 2 nowe neutrony o energii rzędu 2 MeV, produkty rozszczepienia oraz wydzielana jest energia. Neutrony są traczone na skutek absorpcji przez jądra i na skutek ucieczki z reaktora. Zarówno produkcja jak i cały bilans silnie zależy od energii neutronów. Na rysunku 1 zestawione są przekroje reakcji² rozszczepienia (U-235) i wychwytu radiacyjnego (Xe-135, Sm-149 i U-235) jako funkcja energii neutronu. Dla uwypuklenia pewnych spraw ta sama zależność pokazana jest w dwóch różnych skalach, logarytmiczno-logarytmiczna i liniowo-logarytmiczna. Dla większości zakresu energii ww. przekroje są małe i dominuje wśród nich przekrój na rozszczepienie. Jest jednak mały zakres – w pobliżu, 0 – w którym te przekroje są nawet 10^5 razy większe.

Tylko niewielka część z neutronów powoduje następne rozszczepienie – tzw. rozszczepienie na neutronach prędkich. Cała reszta, zdecydowana większość musi zostać spowolniona do energii rzędu 0.025 eV poprzez zderzenia z jądrami lekkich izotopów. Na skali energii, na rysunku 1 neutron musi się przesunąć z miejsca zaznaczonego pionową linią do prawie zera. Są jednak dwa izotopy, produkty rozszczepienia – Xe-135 i Sm-149, dla których przekrój reakcji (n, γ) staje się odpowiednio

² Przekrój reakcji – wielkość charakteryzująca prawdopodobieństwo zajścia reakcji

1000 i 10 razy większy niż przekrój na rozszczepienie U-235, (n,f). Jedno rozszczepienie U-235 wnosi do bilansu energii 168.2 MeV a jeden wychwyt radiacyjny, (n, γ) tylko 5 MeV i mniej [2]. Wychwyt radiacyjny powoduje podwójną stratę – zmniejsza produkcję neutronów i zmniejsza produkcję energii. Proces spowalniania neutronów zwiększa produkcję neutronów, bo rośnie ilość rozszczepień, ale zwiększa także wrażliwość na trucizny reaktorowe.



Rysunek 1. Zależność od energii przekrojów czynnych na wychwyt neutronu przez jądro xe-135, sm-149, u-235 oraz na rozszczepienie jądra u-235. Lewy wykres - obie osie w skali logarytmicznej, prawy – x - skala liniowa y -logarytmiczna . Pionowa kreska pokazuje średnią energię produkowanych w trakcie rozszczepienia neutronów, strzałka – kierunek zmian energii neutronu w trakcie spowalniania.

Aby bilans produkcji i strat neutronów był równy zero, tzn. by możliwa była reakcja łańcuchowa i praca reaktora każdy wzrost strat musi być równoważony wzrostem produkcji neutronów. W praktyce oznacza to, że musimy mieć zapas uranu w reaktorze.

Parametrem reaktora zbliżonym do pojęcia bilansu neutronów jest reaktywność reaktora³ oznaczana symbolem ρ . Jeżeli $\rho=0$ to reaktor jest w równowadze, pracuje na stałej mocy. $\rho<0$ Oznacza, że straty neutronów są większe niż produkcja i reaktor gaśnie. $\rho>0$ Produkcja w każdym pokoleniu neutronów przeważa nad stratami, neutronów przybywa, rośnie moc reaktora. Mieć zapas uranu w reaktorze oznacza także mieć zapas reaktywności.

Opisany dotychczas wpływ trucizn na pracę reaktora odczuwalny jest natychmiast po rozszczepieniu jądra. Zależy on głównie od składu materiałowego reaktora. Są jednak także opóźnione objawy działania trucizn.

³ Dokładniej $\rho = \frac{k_{eff} - 1}{k_{eff}}$, gdzie k_{eff} jest efektywnym współczynnikiem mnożenia neutronów.

Długofalowe objawy działania trucizn reaktorowych

Ksenon Xe-135 produkowany jest na dwa sposoby – w procesie rozszczepienia jądra paliwa, jako tzw. produkt rozszczepienia oraz w procesie przemian radiacyjnych innych produktów rozszczepienia – patrz łańcuch przemian poniżej. Jednocześnie sam wypala się, tzn. pochłania neutrony i przekształca się, w Xe-136, słaby absorber neutronów. Ponadto jest radioaktywny i poprzez przemianę β^-

przekształca się w znacznie mniej trujący Cs-135. Kinetykę tych procesów charakteryzują parametry podane w tabeli 1.

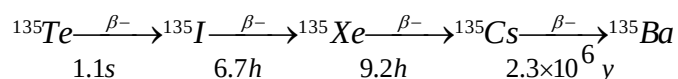


Tabela 1. Parametry przemian łańcucha Xe-135 [3,4]

Parametr\Izotop	Te-135	I-135	Xe-135	Cs-135	Ba-135
$T_{1/2}$	19 s	6.57 h	9.1 h	2.3×10^6 y	∞
γ_{ind} [%]	3.22	2.93	0.0785	4.91×10^{-4}	
γ_{cum} [%]	3.34	6.28	6.54	6.54	
σ_a [b]			1×10^7		

Źródło: <http://ie.lbl.gov/fission/235ut.txt>

Oznaczenia: $T_{1/2}$ – okres półrozpadu izotopu

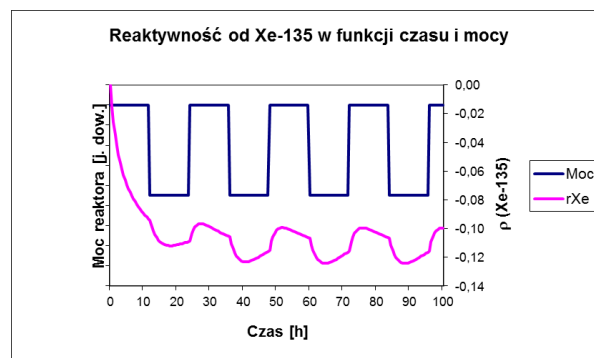
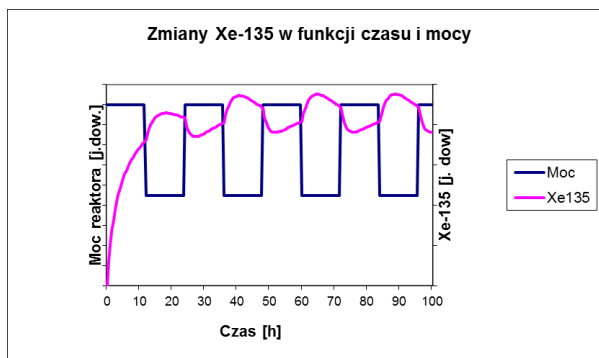
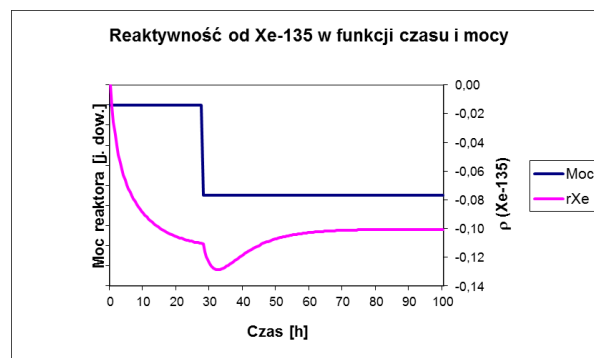
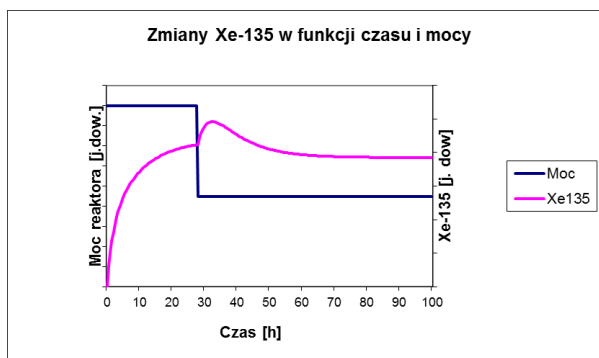
γ_{ind} – wydajność produkcji w trakcie rozszczepienia, [%]

γ_{cum} – skumulowana wydajność produkcji, [%]

σ_a – przekrój na absorpcję, wychwyt radiacyjny, [b]

Po włączeniu reaktora i pracy na stałej mocy ilość Xe-135 rośnie, ale po pewnym czasie ustali się równowaga między produkcją a wypalaniem i rozpadem, ilość Xe-135 ustali się na pewnym poziomie. Wielkość ta zależy od poziomu mocy reaktora. Zmiana mocy powoduje także zmiany ilości Xe-135 w reaktorze, przy czym zmiany te mają charakter trochę zaskakujący, gdyż zmniejszenie mocy reaktora powoduje wzrost ilości Xe-135. Przebieg zmian Xe-135 pokazany jest na rysunku 2 a odpowiadające im zmiany reaktywności na rysunku 3. Rysunki te nie dotyczą żadnego konkretnego reaktora tylko mają charakter poglądowy.

Trzeba mieć świadomość, że po zmniejszeniu mocy maleje reaktywność reaktora i przy zbyt małym zapasie reaktywności reaktor może zgasnąć, chociaż tego nie planowaliśmy. Także po wyłączeniu reaktora Xe-135 nadal przybywa i przy zbyt małym zapasie reaktywności przez pewien czas, aż Xe-135 rozpadnie się reaktor może nie dać się uruchomić. Zjawisko spadku reaktywności reaktora po zmniejszeniu mocy lub wyłączeniu powodowanego przyrostem Xe-135 nazywa się jamą ksenonową. Niewłaściwa reakcja obsługi elektrowni w Czarnobylu na efekt jamy ksenonowej doprowadziła do awarii, ale to oddzielny temat [6].



Rysunek 2. Zmiany ilości Xe-135 w reaktorze w funkcji czasu i mocy

Rysunek 3. Wkład Xe-135 do reaktywności reaktora w funkcji czasu i mocy

Drugą znaczącą trucizną reaktorową jest samar-149 (Sm-149). Łańcuch jego przemian jest pokazany poniżej a parametry kinetyki w tabeli 2.

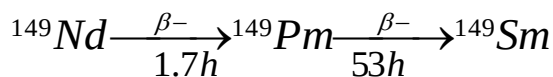


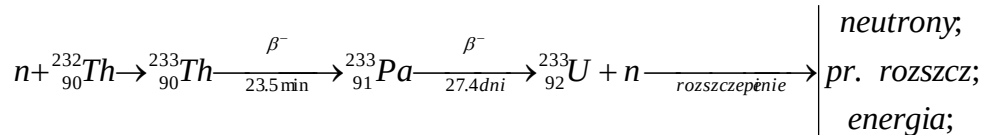
Tabela 2. Parametry przemian łańcucha Sm-149 [3,4]

Parametr\Izotop	Nd-149	Pm-149	Sm-149
$T_{1/2}$	1.72 h	2.212d	1×10^{16} y
γ_{ind} [%]	6.81×10^{-3}	3.87×10^{-6}	1.71×10^{-10}
γ_{cum} [%]	1.08	1.08	1.08
σ_a [b]			1×10^5

Źródło: <http://ie.lbl.gov/fission/235ut.txt>

Jeszcze jedna trucizna – Pa-233

Potencjalnym surowcem dla energetyki jądrowej jest Th-232. Do wykorzystania nadaje się dopiero po przetworzeniu na U-233. Cykl przemian towarzyszących tej przemianie pokazany jest poniżej.



Taki cykl może być zrealizowany tylko w reaktorze jądrowym i to nie w każdym. Problem stanowi Pa-233, który ma okres półrozpadu 27.4 dni a przekrój czynny na absorpcję większy niż Th-232 i powoduje „zejście” z przedstawionego tu łańcucha przemian. Powoduje straty w bilansie neutronów, czyli jest trucizną reaktorową. Aby ten cykl był samowystarczalny a nawet produkował więcej U-233 niż zużył Th-232 wymagana jest możliwość separacji Pa-233 z paliwa, przetrzymania go poza reaktorem aż przekształci się w U-233 a następnie zwrócenia do reaktora. Potrzebna jest przeróbka on-line paliwa wypalonego. Najodpowiedniejszy do tego jest reaktor na stopionych solach – z angielska MSR. Więcej na ten temat można znaleźć w [5].

Wykorzystanie trucizn do sterowania reaktorem przez człowieka

Trucizny reaktorowe, silne absorbery neutronów są wykorzystywane przez człowieka w dwóch aspektach – do wyłączania i włączania reaktora oraz do wydłużania kampanii paliwowej.

Uruchomienie reaktora energetycznego przebiega według skomplikowanej procedury i chciałoby się go raz uruchomić i nie zaglądać do niego przez najbliższe 12, 18 a nawet 24 miesiące. Trzeba, więc załadować więcej paliwa niż tzw. masa krytyczna⁴. Ten nadmiar zostanie wypalony w trakcie kampanii paliwowej. Wnosi on jednak dodatkową reaktywność, którą trzeba skompensować. Kompensuje się ją przy pomocy silnych absorberów. Absorbery te występują w trzech postaciach – tzw. pręty regulacyjne i bezpieczeństwa, rozpuszczalne trucizny wypalające dodawane do moderatora i trucizny wypalające stałe, dodawane do elementów paliwowych. Typowy zapas reaktywności dla reaktora typu PWR podany jest w tabeli poniżej.

Tabela 3. Typowy zapas reaktywności w reaktorze PWR [7]

Całkowity zapas reaktywności, $\Delta\rho$	0.32
Waga prętów regulacyjnych	0.07
Trucizny wypalające stałe	0.08
Trucizny rozpuszczalne	0.17

⁴ Masa krytyczna – minimalna ilość paliwa dla danej geometrii reaktora niezbędna do zajścia reakcji łańcuchowej, do uzyskania stanu krytycznego.

Pręty regulacyjne

Pręty regulacyjne pozwalają na niemal natychmiastową reakcję na zmiany w reaktorze. Można je wsuwać do i wysuwać z rdzenia. W reaktorach PWR łączy się je w zespoły po 24 pręty zwane klastrami – patrz rysunek 4. I tak w reaktorze AP1000 na 157 kaset paliwowych 69 z nich zawiera zespoły regulacyjne. Część z nich jest wyciągnięta całkowicie z rdzenia reaktora i trzymana w pogotowiu na wypadek awarii, jako tzw. pręty bezpieczeństwa a część zanurzona częściowo i używana do rzeczywistego sterowania.

Dobór absorbera wymaga uwzględnienia kilku czynników. Musi absorbować neutrony, ale nie za bardzo, bo wypaliłby się szybko i straciłoby się możliwości kontroli reaktora. Nie może być radioaktywny, bo także przestałby być absorberem. Musi mieć odpowiednie właściwości mechaniczne. W tabeli 4 podane są typowe izotopy używane w prętach regulacyjnych. W reaktorach PWR stosuje się po kilka z nich jednocześnie. I tak w EPR w górnej części pręta umieszcza się węgiel boru (B_4C) a w dolnej stop srebra, indu i kadmu.

W czasie normalnej eksploatacji reaktora pręt regulacyjny porusza się skokowo - jeden krok 10 mm. Pamiętać trzeba, że nie każdy krok „waży” tyle samo. Związane jest to z osiowym rozkładem strumienia neutronów w reaktorze. Na krańcach reaktora strumień jest najmniejszy a w środku największy. Końcowe kroki przy wyciąganiu pręta „znaczą” najmniej. Jak widać na rysunku 5 pręt wysunięty do połowy prawie nic nie znaczy. Dalsze wyciąganie go już nic nie zmienia. W przypadku awarii pręty są „zrzucone” do rdzenia, ale taki zrzut trwa. Systemy sterowania reaktora mają nałożone limity na wielkość wysunięcia pręta by nie dopuścić do sytuacji, w której pręt nie zdążyłby opaść i zgasić reaktor.

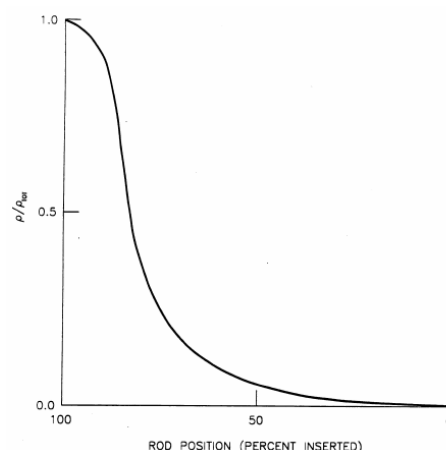
Tabela 4. Przekroje czynne na absorpcję neutronów termicznych materiałów używanych w prętach regulacyjnych [8]

	B-10	B-11	Ag-105	Ag-107	Cd-113 †	In-115	Hf-174	Hf-176	Hf-177	Hf-178	Hf-179	Hf-180
σ_a [barn]	3835	0.006	38	91	20600	202	561	24	373	84	41	13
Zawartość izotopu [%]	20	80	52	48	12	96	0.2	5	19	27	14	35

†Cd-113 ma silne rezonanse w obszarze termicznym



Rysunek 4. Kaset paliwowa reaktora EPR z wyciągniętymi częściowo prętami regulacyjnymi.



Rysunek 5 Waga pręta w funkcji zanurzenia[9]

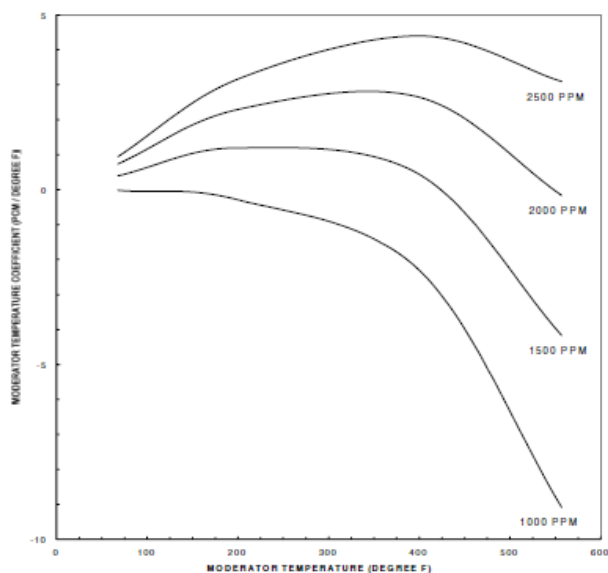
Kwas borny jako trucizna wypalająca, rozpuszczalna w moderatorze

Kwas borny – H_3BO_3 – dodawany jest do moderatora na początku kampanii paliwowej. Jego koncentracja jest regulowana w trakcie eksploatacji, ale jest to proces dużo wolniejszy niż ruch pręta regulacyjnego. Zaletą jego jest fakt, że absorbuje neutrony termiczne, że wypala się w trakcie kampanii, ale ma też kilka wad.

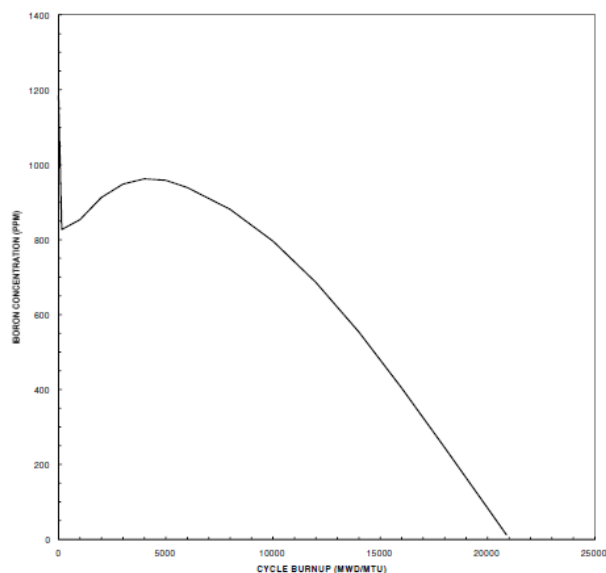
Po pierwsze jest to kwas i powoduje korozję. Zwiększając jego koncentrację przyspieszamy korozję.

Po drugie jego koncentracja jest taka sama w całej objętości reaktora. Nie rozwiązuje problemu „spłaszczenia” rozkładu strumienia neutronów w rdzeniu. Strumień neutronów w reaktorze jest największy w centrum a najmniejszy na krańcach. Oznacza to, że elementy w centrum wypalają się szybciej niż skrajne. Tworzy się w nich wyższa temperatura, która osłabia własności mechaniczne koszulek. Z drugiej strony powstaje w tych elementach więcej gazowych produktów rozszczepienia i mogłoby dojść do pęknięcia koszulki, do rozsadzenia pręta paliwowego. Zadaniem eksploatatorów jest nie dopuścić to tego.

Po trzecie ze wzrostem koncentracji kwas borny ma „za mało ujemny” temperaturowy współczynnik reaktywności. Żeby reaktor był bezpieczny przy wzroście temperatury musi mieć tendencję do samo gaszenia. Mało tego, tendencja ta musi wzmacniać się ze wzrostem temperatury. Oznacza to, że temperaturowy współczynnik musi stawać się coraz bardziej ujemny ze wzrostem temperatury. Jak widać na rysunku 6 ten wymóg spełniony jest tylko dla koncentracji H_3BO_3 poniżej 1000 ppm (parts per milion). Na rysunku 7 widać zmiany koncentracji w trakcie kampanii paliwowej reaktora AP1000.



Rysunek 6. Temperaturowy współczynnik reaktywności dla reaktora AP1000 w funkcji temperatury i koncentracji H_3BO_3 [9].



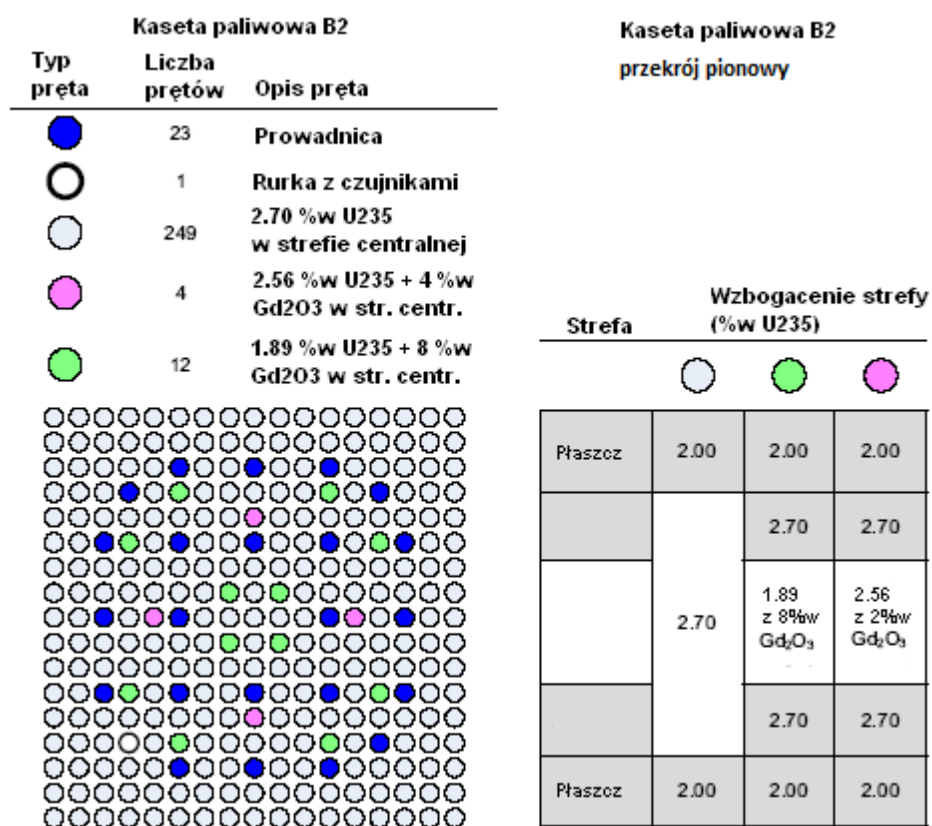
Rysunek 7. Typowe wartości koncentracji H_3BO_3 w trakcie kampanii paliwowej reaktora AP1000 [9].

Stałe trucizny wypalające

Stałe trucizny mają za zadanie nie tylko skompensować zapas reaktywności – wydłużyć kampanię – ale także spłaszczyć rozkład strumienia neutronów – zwiększyć średnie wypalenie paliwa. Jako stałą truciznę, w EPR stosuje się trójtlenek gadolinu (Gd_2O_3). Powleka się nim pastylki paliwowe dzięki czemu gadolin ekranuje paliwo przed neutronami. Pochłaniając silnie neutrony nie dopuszcza do rozszczepiania paliwa zawartego w środku. Po pewnym czasie gadolin się wypali i zawarte w nim paliwo może brać udział w bilansie neutronów, bo dochodzą do niego neutrony.

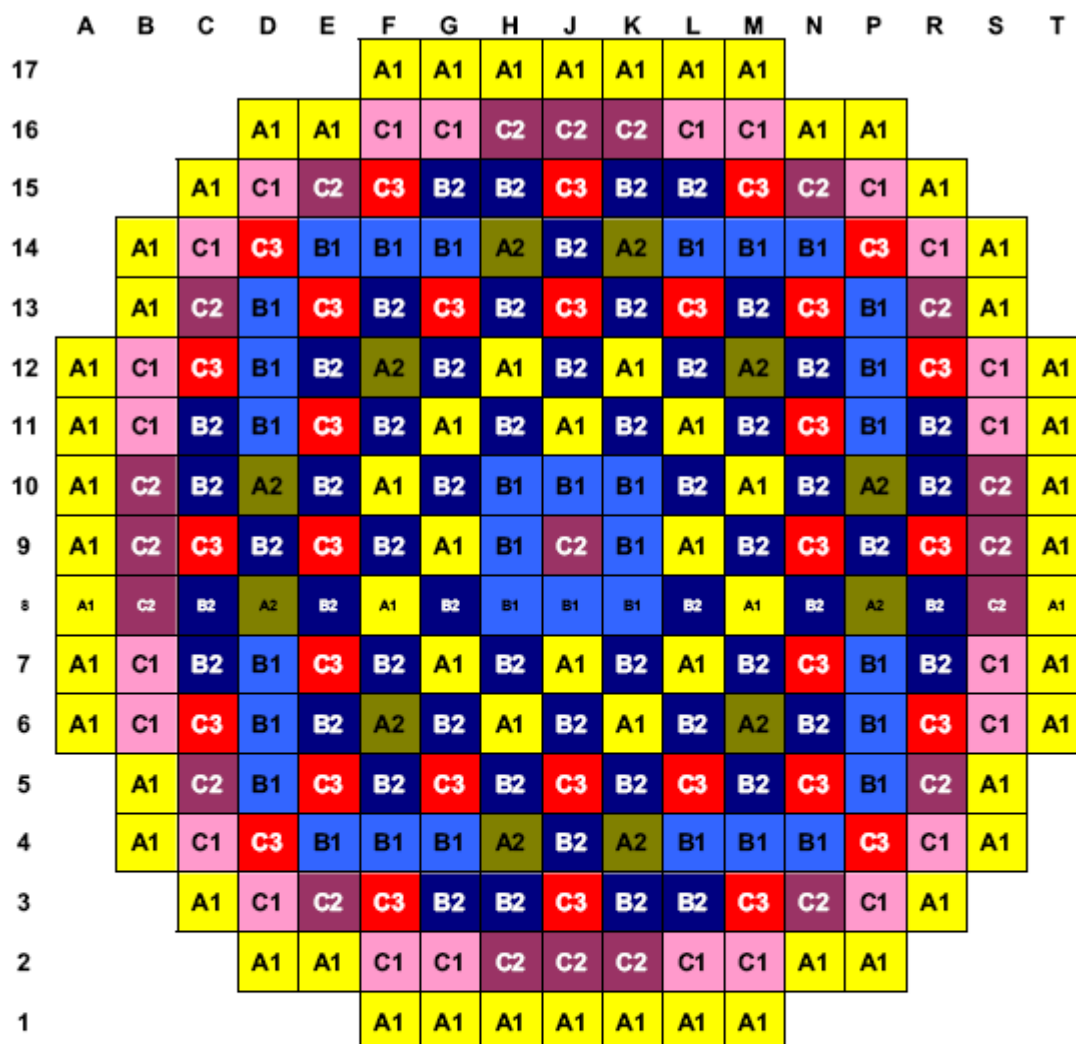
Profilowanie (spłaszczanie) rozkładu mocy osiąga się w ten sposób, że część prętów paliwowych w kasecie zastępuje się prętami z paliwem ekranowanym Gd_2O_3 . Zasada jest taka, że w miejsca gdzie bez włożenia gadolinu rozkład strumienia osiągnąłby maksimum (strefa centralna rdzenia) wkłada się kasety z większą zawartością gadolinu a w miejsca gdzie minimum wstawia się paliwo o większym wzbogaceniu, bez gadolinu. Profiluje się nie tylko rozkład poziomy strumienia, ale także i pionowy (osiowy). Nie wszystkie pastylki paliwowe prętów z gadolinem są powlekane gadolinem. Skrajne pastylki nie są a tylko pastylki centralne powlekane gadolinem. W zależności od ilości prętów paliwowych z gadolinem rozróżnia się wstępnie 7 typów kaset paliwowych – A1, A2, B1, B2, C1, C2 i C3. Rozmieszczenie gadolinu w kasecie zilustrowane jest na przykładzie kasety B2 – rysunek 8. Przykładowa konfiguracja rdzenia EPR z gadolinem pokazana jest na rysunku 9.

Zastosowanie gadolinu poprawia wskaźniki ekonomiczne reaktora, ale wymaga bardzo drobiazgowych analiz i planowania. Trudno jest ustalić jakiś szablon wg., którego będzie się ładowało paliwo na kolejne kampanie. Załadunek planuje się na każdą kampanię oddzielnie.



Rysunek 8 Kaseta reaktora EPR typu B2 - z dodatkami trucizny wypalającej Gd_2O_3 – przekrój poziomy i pionowy

ELEKTROWNIE JĄDROWE



Typ paliwa		Opis kasety
A1		2.25 %w wzbogacenia bez gadolinu
A2		2.25 %w wzbogacenia, 4 pręty z 4 %w gadolinu
B1		2.70 %w wzbogacenia, 8 prętów z 8 %w gad. 4 pręty z 4 %w gadolinu
B2		2.70 %w wzbogacenia, 12 prętów z 8 %w gad. 4 pręty z 2 %w gadolinu
C1		3.25 %w wzbogacenia, 4 pręty z 6 %w gad. 4 pręty z 2 %w gadolinu
C2		3.25 %w wzbogacenia, 8 prętów z 6 %w gad. 4 pręty z 2 %w gadolinu
C3		3.25 %w wzbogacenia, 12 prętów z 8 %w gad. 4 pręty z 2 %w gadolinu

EPR2135 T2

Rysunek 9 Typowa mapa pierwszego załadunku rdzenia reaktora EPR

Oprócz trójtlenku gadolinu, jako stałe trucizny wypalające Westinghouse używa w AP1000 też związków boru (ZrB_4 , B_4C). AP1000 ma część prętów z truciznami ulokowane w prowadnicach

niewykorzystanych ani przez pręty regulacyjne ani przez oprzyrządowanie. Są to rurki ze szkła boro-silikatowego w dwustronnej koszulce ze stali nierdzewnej [9]. W innym rozwiązaniu jest to stop $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}_4\text{C}$ (14.0 %W B_4C) uformowany w pastylki o kształcie pierścieni w koszulce ze stopu Zircaloy. Pręty te mogą być wymieniane po roku eksploatacji.

Podsumowanie

Trucizny reaktorowe są to substancje silnie pochłaniające neutrony. W zasadzie większość izotopów mogłaby być zaklasyfikowana do trucizn, ale zwyczajowo nazwa dotyczy najsilniejszych absorberów – Xe-135, Sm-149, B-10.

Xe-135 i Sm-149 powstają w trakcie rozszczepienia jąder paliwa bądź z rozpadu radiacyjnego tzw. poprzedników. Ich ilość zależy silnie od przebiegu mocy reaktora, co czasami może być źródłem kłopotów.

Człowiek wykorzystuje trucizny reaktorowe do sterowania pracą reaktora. Do włączania i wyłączania wykorzystuje się trucizny umieszczone w prętach paliwowych. Do wydłużania kampanii paliwowej wykorzystuje się kwas borny, (H_3BO_3) rozpuszczany w moderatorze lub trójtlenek gadolinu (Gd_2O_3) dodawany na stałe do paliwa.

Literatura:

1. *Introduction to Nuclear Engineering, Third Edition* - John R. Lamarsh, Anthony J. Baratta
2. http://www.kayelaby.npl.co.uk/atomic_and_nuclear_physics/4_7/4_7_1.html
3. <http://ie.lbl.gov/fission/235ut.txt>
4. <http://www.nds.iaea.org/ngatlas2/>
5. S. Kilim, *Przeróbka on-line paliwa wypalonego w reaktorach na stopionych solach –osiągnięcia i problemy*, EKOATOM, 9.
6. http://pl.wikipedia.org/wiki/Katastrofa_elektrowni_j%C4%85drowej_w_Czarnobylu
7. M. Johnson et al, *Modeling of Reactor Kinetics and Dynamics*, INL/EXT-10-19953.
8. <http://large.stanford.edu/courses/2011/ph241/grayson1/>
9. http://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/design-cert/ap1000/dcd/Tier%202/Chapter%204/4-3_r14.pdf
10. U.S. EPR FINAL SAFETY ANALYSIS REPORT, 06_FSAR_Tier_2_Section_4.3

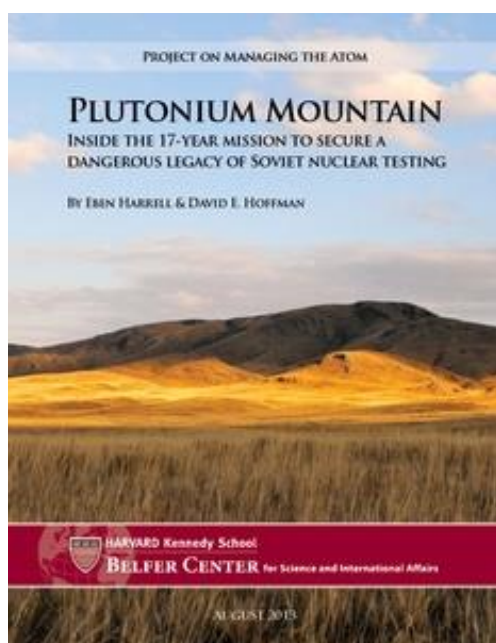
Jerzy Chmielewski

RATUJMY ŚWIAT PRZED GÓRĄ PLUTONU

Jedna z najdonioślejszych historii o nierozprzestrzenianiu broni jądrowej o której nigdy nie mówiono

W znanej amerykańskiej gazecie The Washington Post okazał się ostatnio artykuł poruszający pewien bardzo ciekawy, ale utajniony dotychczas problem. Autorami artykułu są: David E. Hoffman oraz Eben Harrell. Hoffman jest jednym z redaktorów tej gazety, natomiast Harrell reprezentuje Belfer Center przy Szkole Kennedy'ego na Uniwersytecie Harvard, gdzie uczestniczy w pracach na projektem "Managing the Atom". Temat ten znalazł się również na łamach czasopisma The Bulletin of Atomic Scientists.

Belfer Center for Science and International Affairs wydał z tej okazji 44-stronicowy raport zatytuowany: "Plutonium Mountain - Inside the 17-year Mission to Secure a Dangerous Legacy of Soviet Nuclear Testing" opracowany przez tych samych autorów. Na ten cel autorzy Raportu otrzymali grant m.in. od Ośrodka Pulitzera.



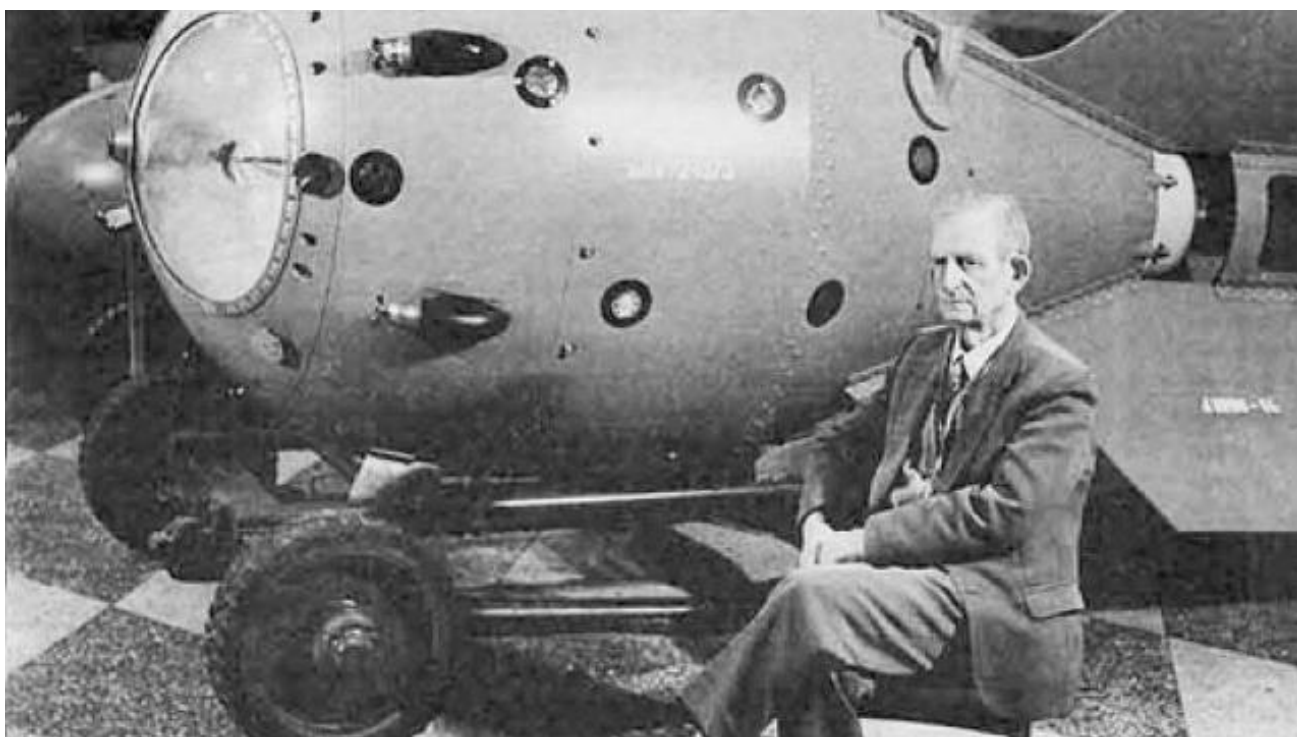
Rys.1 - Raport "Plutonium Mountain"

W październiku 2012 roku duża grupa naukowców i inżynierów amerykańskich, kazachskich i rosyjskich, specjalizujących się w dziedzinie badań jądrowych, zgromadziła się na jednym ze skalistych zboczy góry Degelen, aby dokonać symbolicznej ceremonii. Po wygłoszeniu kilku przemówień odsłonięto kamienny pomnik w postaci trzech płyt, na których zamieszczony został napis w językach angielskim, kazachskim i rosyjskim:

"1996 - 2012. Świat stał się bezpieczniejszy".

Symboliczne przecięcie skromnej wstęgi oznaczało zakończenie jednej z największych i najbardziej złożonych operacji w dziedzinie bezpieczeństwa jądrowego od czasu "Zimnej Wojny". Ta ściśle tajna misja specjalistów amerykańskich i rosyjskich miała na celu wydobycie i zabezpieczenie plutonu, który pozostał w głębinach ziemi i skał po wielu latach testów przeprowadzanych na tym terenie przez Związek Radziecki. Przewidywano, że gdyby dostał się on w niepowołane ręce np. terrorystów, to jego ilość mogłaby posłużyć do skonstruowania wielu bomb atomowych.

Początki opisywanych wydarzeń sięgają 1949 roku, kiedy to na poligonie w Semipalatyńsku na terenie Kazachskiej Republiki Radzieckiej została przeprowadzona w dniu 29 sierpnia pierwsza próba atomowa o kryptonimie "Первая молния" ("Pierwsza błyskawica"). Podczas tej próby dokonano eksplozji bomby "РДС-1" o mocy 22 kt. Był to akronim nazwy "Реактивный Двигатель Специальный". Drugą operacyjną nazwą było "Изделие-501". (Amerykanie nazywali ją Joe-1.) Bomba była kopią amerykańskiej bomby "Fat Man" zrzuconej na Nagasaki, której dokumentację zdobył radziecki wywiad. Jednym z głównych kierowników tego projektu był fizyk-teoretyk i izykochemik Julian Borysowicz Chariton. Na tym samym poligonie 22 listopada 1949 roku była przeprowadzona próba bomby wodorowej o mocy około 1 MT, której współautorem był Andriej Dmitrijewicz Sacharow.



Rys. 2 - Bomba "РДС-1" i jej konstruktor Julian Borysowicz Chariton.

W okresie "Zimnej Wojny" na odludnych, pustynnych stepach Wschodniego Kazachstanu o powierzchni odpowiadającej terytorium Belgii Związek Radziecki przeprowadził 456 prób jądrowych. Z tej ilości 116 prób przeprowadzono w atmosferze oraz 340 pod ziemią w pionowych szachtach i poziomych tunelach wydrążonych w masywach skalnych góry Degelen. W 181 tunelach zdetonowano 295 urządzeń, a każda z eksplozji zużyła od 1 do 30 procent materiału rozszczepialnego. Reszta tego materiału pozostawała na miejscu lub ulegała rozproszaniu. Niektóre z przeprowadzanych eksperymentów miały na celu badanie wpływu wybuchu konwencjonalnych materiałów wybuchowych na pluton i wysokowzbogacony uran, wykorzystywane do budowy bomb jądrowych, albo opracowywanie zabezpieczeń dla broni jądrowej podczas symulowanych awarii w rodzaju pożaru, lub wybuchu w pobliżu.

Próby były przeprowadzane na powierzchni i w powietrzu, ale znaczna ich ilość była przeprowadzana pod ziemią, w szczególności w tunelach wydrążonych w lokalnym masywie górskim Degelen. Podczas niektórych prób - w szczególności wykonywanych przy użyciu plutonu -

nie wszystkie materiały wyparowywały podczas wybuchu jądrowym. Pozostawały one potem w tunelach i pojemnikach w postaci, która mogła nadawać się odzyskania i przerobu.

Po rozpadzie Związku Radzieckiego w 1991 roku, kiedy powstała niezależna Republika Kazachstanu, Rosjanie zaczęli stopniowo wycofać się z terenów byłych poligonów atomowych dosłownie wszystkie swoje urządzenia i wyposażenie. Nic dziwnego, że wkrótce potem okoliczni mieszkańcy rozpoczęli w tunelach poszukiwania cennych rzeczy, a zwłaszcza wszelkich metali, które można było sprzedać. Kradziono kable miedziane i stalowe szyny po których były kiedyś transportowane atomowe ładunki przewożone na miejsce prób. Wielu z takich szabrowników zginęło, np. w wyniku napromieniowania.

Interesujące są początki kontaktów amerykańskich i rosyjskich atomistów. W sierpniu 1988 roku Siegfried S. Hecker (będący dyrektorem Los Alamos National Laboratory) znajdował się w sterowni ośrodka Nevada Test Site, gdzie trwały przygotowania do jednej z amerykańskich prób atomowych. Obok niego siedział Wiktor Michajłow, kierownik delegacji radzieckich naukowców (a późniejszy Minister Energii Atomowej). Przeprowadzano eksperyment mający na celu weryfikację sposobów monitorowania wielkości eksplozji jądrowych. Był to jeden z elementów inicjatywy podjętej przez Reagana i Gorbaczowa zmierzającej do zakończenia Zimnej Wojny. Wynikła ona z dyskusji technicznych prowadzonych na marginesie negocjacji dotyczących sposobów weryfikacji Traktatu o Częściowym Zakazie Prób Jądrowych ("Threshold Test Ban Treaty"). Miesiąc później Hecker na poligonie w Semipalatinsku obserwował próbę rosyjskiej broni jądrowej. Te wydarzenia zapoczątkowały podstawowy proces budowania wzajemnego osobistego zaufania naukowców przy rozwiązywaniu tak trudnych problemów.

W 1995 roku dwóch amerykańskich naukowców z Los Alamos National Laboratory, którzy wizytowali tereny góry Degelen, doszło do wniosku, że miejsce to jest dla złodziei i terrorystów potencjalną "kopalnią plutonu". Szacowali, że całkowita ilość plutonu znajdującego się na tych terenach może wynosić nawet do 200 kilogramów. (Do bomby atomowej potrzeba ok. 8 kg.) Stwierdzili też, że nikt nie zajmuje się ochroną terenów byłego poligonu.

W celu zabezpieczenia plutonu znajdującego się w głębokich szachtach na poligonie w Semipalatyńsku rosyjscy specjaliści zaproponowali skorzystanie z rozwiązania zastosowanego po awarii atomowej elektrowni w Czernobylu (1986 r.). Koncepcja polegała na zbudowaniu nad szachtami ogromnego betonowego sarkofagu. Projekt pod nazwą "Operation Groundhog" ("Operacja Świstak") po wielu problemach został zakończony w sierpniu 2003 roku.

Wkrótce po zakończeniu "Zimnej Wojny" we wrześniu 2000 roku Stany Zjednoczone Ameryki Północnej oraz Federacja Rosyjska zawarły porozumienie dotyczące utylizacji plutonu wykorzystywanego do celów wojskowych, które zakładało zmniejszenie zapasów materiałów rozszczepialnych z arsenałów jądrowych tych krajów. ("Agreement Between the Government of the United States of America and the Government of the Russian Federation Concerning the Management and Disposition of Plutonium Designated As No Longer Required for Defense Purposes and Related Cooperation," September 2000.)

Z tym ważnym faktem politycznym korespondowała międzynarodowa konferencja "Pluton-2000", która odbyła się w Brukseli w dniach 9 - 11 października 2000 roku. Głównym organizatorem konferencji było Belgijskie Towarzystwo Nuklearne (*Belgian Nuclear Society*), a jej współorganizatorami były bratnie stowarzyszenia Europy, Japonii, Rosji i USA. W konferencji

poświęconej przyszłości tego unikalnego pierwiastka wzięło udział 300 przedstawicieli różnych dziedzin nauki.

Ogromne zainteresowanie wzbudził też artykuł Richarda Stone'a "Plutonium Fields Forever", który ukazał się w znanym czasopiśmie naukowym Science (Science, 23 maj 2003 r.; 1220 -1224).

Pomimo oficjalnego zakończenia trwającej 17 lat formalnej współpracy amerykańskich, rosyjskich i kazachskich naukowców, związanej z badaniem sytuacji na terenach byłego poligonu w Semipalatyńsku, wszyscy mają świadomość, że pozostaje jeszcze wiele problemów do rozwiązania. Amerykanie wyłożyli na tę współpracę 150 milionów dolarów, a potem dostarczyli np. techniczne środki dla zapewnienia fizycznej ochrony zamkniętych obiektów (systemy alarmowe z czujnikami etc.). Nieprzewidywalne są jednak dalsze perspektywy tego rejonu. Rewolucje polityczne mogą spowodować zmiany podejścia to tych problemów. Warto pamiętać, że okres połowicznego rozpadu plutonu-239 wynosi 24.110 lat. Kto wie? Może ktoś pewnego dnia podejmie próby jego wydobycia?



Krzysztof Wojciech Fornalski

KRÓTKO O PODSTAWACH DETEKЦИИ PROMIENIOWANIA

Wstęp

Promieniowanie jonizujące – chociaż jest niewidoczne i nie można go wykryć żadnym ludzkim zmysłem – jest zarówno wykrywalne jak i mierzalne przez odpowiednie urządzenia. Zanim jednak przybliżymy na czym polega detekcja promieniowania, przypomnijmy kilka podstawowych informacji na temat izotopów promieniotwórczych

Izotopy

Każdy atom charakteryzuje się liczbą atomową Z (zwaną też liczbą porządkową) mówiącą o tym ile jest protonów w jądrze, a także liczbą masową A będącą sumą liczby protonów i neutronów:



O ile dla danego pierwiastka liczba protonów (Z) jest stała, o tyle liczba neutronów ($A-Z$) może się zmieniać. Atomy danego pierwiastka różniące się jedynie liczbą neutronów w jądrze nazywamy **izotopami**. Zdecydowana większość pierwiastków posiada wiele, nawet kilkadziesiąt własnych izotopów, czego przykładem jest chociażby rad (34 znane izotopy) czy wodór (3 izotopy, w tym deuter i tryt). Poszczególne izotopy mogą być stabilne lub niestabilne, o czym decyduje m.in. wypadkowa wszystkich oddziaływań zachodzących wewnątrz jądra. **Izotopy niestabilne** mogą ulec rozpadowi promieniotwórczemu, w wyniku czego emitowane jest promieniowanie jonizujące. Efekt ten popularnie nazywany jest **radioaktywnością** i dotyczy większości izotopów występujących w przyrodzie lub wytworzonych sztucznie przez człowieka.

Czas połowicznego zaniku izotopów

Jądro atomowe, podobnie jak każde ciało fizyczne, nie jest obiektem statycznym. Zachodzące w jego wnętrzu zjawiska powodują, iż jądro danego izotopu może być stabilne lub niestabilne. Wśród poznanych dotychczas ok. 3 tys. różnych izotopów, jedynie ok. 260 to izotopy trwałe, które nie ulegają przemianom. Pozostałe izotopy mogą samorzutnie przekształcić się (rozpaść) w izotopy innych pierwiastków. Rozpady te mogą być również sztucznie indukowane przez człowieka, ale w zdecydowanej większości przypadków nietrwałe jądra ulegają samoczynnym rozpadom¹, z różnym prawdopodobieństwem.

Z prawdopodobieństwem rozpadu jądra związane jest pojęcie **czasu połowicznego zaniku** (zwanego też **okresem półrozpadu**, $T_{1/2}$), po którym połowa jąder z początkowej ich liczby rozpadła się. Czas połowicznego zaniku jest wielkością charakteryzującą dany izotop promieniotwórczy i w zależności od izotopu może wynosić od ułamków sekund do miliardów lat.

¹ rozpad jądra atomowego nie oznacza, iż jądro znika. Jądro przekształca się w jądro o niższej energii, a jeśli przy okazji doszło do emisji cząstki – w jądro innego izotopu

Z czasem połowicznego zaniku związane jest tzw. **prawo rozpadu promieniotwórczego**, które mówi, iż każde niestabilne jądro rozpadnie się, a prawdopodobieństwo tego rozpadu zależy od typu izotopu. Matematycznie można to zapisać w postaci funkcji eksponencjalnej: jeśli za N_0 przyjmiemy początkową liczbę atomów danego izotopu, a za λ stałą rozpadu (charakteryzującą dany izotop), to po czasie t pozostanie N atomów: $N = N_0 \exp(-\lambda t)$. Znając stałą rozpadu λ można z powyższej zależności wyprowadzić wzór na czas połowicznego zaniku: $T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$.

Izotopy promieniotwórcze (zwane także radioizotopami) wykorzystuje się powszechnie na potrzeby medycyny, nauki czy przemysłu. Można je uzyskać ze źródeł naturalnych lub wytworzyć sztucznie za pomocą odpowiednich technik. W przyrodzie występuje wiele różnego rodzaju radioizotopów, które są stałym składnikiem wody, powietrza i gleby. Stanowią one ważny element tzw. promieniotwórczości naturalnej.

Aktywność

Powiedzieliśmy już, iż jądra atomowe niestabilnych izotopów mogą ulec rozpadom, w wyniku czego emitowane jest promieniowanie. Z kolei prawdopodobieństwo takiego rozpadu związane jest z typem danego izotopu. Częściej jednak niż prawdopodobieństwa używa się pojęcia **aktywności promieniotwórczej**.

Z definicji aktywność **A** jest to liczba rozpadów promieniotwórczych w jednostce czasu. Podstawową jednostką aktywności jest jeden bekerel [Bq] (od nazwiska odkrywcy promieniotwórczości, H. Becquerel'a) równy jednemu rozpadowi na sekundę [$1 \text{ Bq} = 1 \text{ rozpad} / \text{s}$]. Jednakże historycznie pierwszą jednostką aktywności był kiur [Ci]. Jeden kiur jest zdefiniowany jako aktywność jednego grama radu-226, a nazwa pochodzi od nazwiska Marii Skłodowskiej-Curie. Kiury na bekerele przelicza się następująco: $1 \text{ Ci} \approx 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq} = 37 \text{ GBq}$. Widać, iż kiur jest jednostką bardzo dużą, a bekerel małą.

Aktywność jest wielkością bezwzględną, co oznacza, iż podawana wartość odnosi się do aktywności całej mierzonej próbki. Może się tak zdarzyć, iż aktywność wielkiego bloku granitu może być większa niż aktywność małej próbki substancji relatywnie mocno promieniotwórczej. W związku z tym wprowadzono pojęcie **aktywności właściwej**, czyli aktywności przypadającej np. na jednostkę masy, objętości, powierzchni emitującej cząstki etc. Szczególnym przypadkiem jest tzw. **stężenie promieniotwórcze** zdefiniowane jako aktywność w masie [Bq/kg].

Aktywność właściwa substancji o krótkim czasie połowicznego zaniku ($T_{1/2}$) jest wyższa od aktywności właściwej substancji o długim czasie połowicznego zaniku. Przykładowo jeśli weźmiemy jeden mol (stała liczba atomów równa tzw. liczbie Avogadro) substancji długożyciowej (np. uranu-238) oraz jeden mol substancji krótkożyciowej (np. jodu-131), to taka sama liczba atomów rozpadnie się w innym czasie, w zależności od średniego czasu życia. Innymi słowy aktywność, czyli liczba rozpadów na sekundę, dla jodu-131 będzie większa niż dla uranu-238. Oczywiście z uwagi na omawiane wcześniej prawo rozpadu promieniotwórczego, **aktywność danej próbki maleje z czasem**. Spadek ten opisuje się analogiczną zależnością eksponencjalną, $A = A_0 \exp(-\lambda t)$.

Detekcja promieniowania

Strach przed promieniowaniem (tzw. radiofobia) związany jest z tym, iż jest ono praktycznie niewidoczne dla ludzkich zmysłów. Jednakże w ciągu całego okresu, który minął od odkrycia

zjawiska promieniotwórczości, ludzie nauczyli się w precyzyjny sposób je wykrywać, mierzyć i badać.

Podstawowym zjawiskiem, dzięki któremu możliwe jest wykrycie promieniowania, jest wspomniana już jonizacja. W ogólności w akcie jonizacji cząstki promieniowania powodują odrywanie elektronów z ich powłok (orbitali) wokół macierzystych jąder. Temu zjawisku towarzyszy powstawanie par ładunków, co następnie jest wykorzystywane przy detekcji.

Istnieje wiele typów detektorów promieniowania. Wykorzystuje się detektory stałe, w których substancja aktywna reaguje na powstałe ładunki, niczym klisza fotograficzna na światło (tzw. detektory pasywne). W tym przypadku najczęściej używa się tzw. detektorów fotometrycznych, detektorów termoluminescencyjnych (TLD) lub detektorów optoluminescencyjnych (OSL). Z kolei detektory gazowe wykorzystują zjawisko jonizacji do detekcji niewielkiego impulsu elektrycznego w odpowiednio skonstruowanym obwodzie detektora. Najpopularniejszym urządzeniem tego typu jest licznik Geigera-Muellera.

Sercem licznika Geigera-Muellera jest cylindryczna tuba wypełniona gazem oraz dwoma elektrodami pod dużym napięciem. Dzięki zastosowaniu takiej techniki powstałe w wyniku aktu jonizacji ładunki biegają do właściwych elektrod generując tym samym sygnał elektryczny, który następnie jest przetwarzany do postaci dźwięku (charakterystyczne trzaski), błysku czy wartości cyfrowej.

Akt jonizacji jest formą przekazania ośrodkowi porcji energii przez przechodzące promieniowanie. Poza detekcją promieniowania ów przekaz energii jest istotny z punktu widzenia ochrony radiologicznej.

Zjawiska fizyczne przy oddziaływaniu promieniowania z materią

Wspomniana już jonizacja jest określeniem ogólnym szeregu zjawisk fizycznych, które zachodzą w wyniku oddziaływania promieniowania z materią. Wszystkich tych zjawisk opisać w ramach jednego artykułu jest nie sposób, wobec tego poniżej przedstawiono te najbardziej znane.

Dla przypomnienia: generalnie zjawisko jonizacji jest typowe dla cząstek obdarzonych ładunkiem, takich jak elektrony (promieniowanie β) czy jądra helu (promieniowanie α). W przypadku cząstek pozbawionych ładunku (neutrony) mamy do czynienia z jonizacją pośrednią, kiedy to neutron przekazuje swoją energię protonowi, a ten, jako już cząstka naładowana, dokonuje aktów jonizacji. Nieco bardziej skomplikowana sytuacja ma miejsce w przypadku oddziaływania z materią fotonów, czyli promieniowania gamma (γ) oraz X (rentgenowskiego).

Wysokoenergetyczne promieniowanie elektromagnetyczne, czyli γ i X, jest to strumień bezmasowych i elektrycznie obojętnych fotonów. W związku z tym nie mogą one dokonywać bezpośrednich aktów jonizacji, jednakże oddziałują one z materią za pomocą trzech głównych procesów:

- **efekt fotoelektryczny** – zachodzi, gdy foton uderza w elektron, który znajduje się na niskiej powłoce elektronowej, bliskiej jądra (czyli elektron silnie związany z jądrem); w takim przypadku foton zostaje pochłonięty, a elektron wybity;
- **zjawisko Comptona** – czyli rozpraszanie fotonów na swobodnych elektronach, bądź elektronach słabo związanych (np. na ostatnich, najdalszych od jądra, powłokach

elektronowych); w tym przypadku padający foton traci swoją energię na rzecz nowowybitego elektronu;

- **kreacja par elektron-pozyton** – w wyniku tej reakcji powstaje para elektron-pozyton (antyelektron), a padający foton jest całkowicie pochłaniany. Aby doszło do tej reakcji, energia padającego fotonu musi być odpowiednio duża; konieczne jest również uczestniczenie trzeciego ciała (np. jądra atomowego) jako katalizatora. W związku z tym kreacja par elektron-pozyton nie zachodzi dla promieniowania X. Fotony promieniowania rentgenowskiego posiadają za małą energię, która jest potrzebna do wytworzenia elektronu i pozytonu. Zgodnie ze słynnym wzorem $E = mc^2$ energia padającego fotonu musi być równa (lub większa) od energii odpowiadającej masie spoczynkowej elektronu i pozytonu, tj. $2 \times 511 \text{ keV}$.

Prawdopodobieństwo zajścia któregoś z wymienionych efektów zależy od energii padającego fotonu oraz od liczby masowej materiału absorbentu.

W praktyce padający foton tworzy tzw. **kaskadę fotonowo-elektronową**, gdzie fotony wybijają elektrony, elektrony generują fotony i tak dalej.

Oprócz zjawiska jonizacji przejściu naładowanej cząstki przez materię może towarzyszyć także tzw. promieniowanie hamowania (niem. *Bremstrahlung*). Powstaje ono, kiedy naładowana cząstka (np. elektron) biegnie w pobliżu jądra atomowego, a ruch cząstki jest zakrzywiany w jego polu. W wyniku zakrzywienia ruchu emitowane jest promieniowanie elektromagnetyczne (przeważnie X), co ma zastosowanie m.in. w lampach rentgenowskich.

Z kolei oddziaływanie z materią ciężkich cząstek naładowanych opisuje tzw. wzór Bethe-Blocha, który będzie omówiony w oddzielnym artykule.

Pojęcie dawki promieniowania

Identyczne zjawiska oddziaływania promieniowania z ośrodkiem, jakie zachodzą w przypadku materii nieożywionej, zachodzą także w organizmie człowieka. W związku z tym, aby oszacować poziom narażenia ludzi na promieniowanie jonizujące, wprowadzono pojęcie **dawki**.

W ogólności dawka jest to ilościowa charakterystyka promieniowania jonizującego, które zostało zaabsorbowane przez organizm. W związku z dużą liczbą typów promieniowania oraz ich różnym sposobom oddziaływania, nie istnieje jedno pojęcie dawki. Szczegółowy opis wszystkich typów dawek (w tym ich wielkości operacyjne) nie będzie w tym miejscu podawany. Wspomnimy jedynie o trzech podstawowych typach, a mianowicie:

- **dawka pochłonięta, D** – jest to ilość energii pochłoniętej (zdeponowanej) w jednostce masy; dawkę pochłoniętą mierzymy w grejach [Gy], gdzie grej jest równy jednemu dżulowi podzielonemu przez kilogram [$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J} / \text{kg}$];
- **dawka równoważna (ekwiwalentna), H** – jest to dawka pochłonięta z uwzględnieniem biologicznej skuteczności danego typu promieniowania; dawkę równoważną mierzy się w siwertach [Sv] i podaje się ją najczęściej w odniesieniu do konkretnego narządu w ciele człowieka;
- **dawka skuteczna (efektywna), E** – jest to dawka równoważna w odniesieniu do całego organizmu człowieka, gdyż różne narządy posiadają różną promieniowrażliwość; dawka

skuteczna jest również mierzona w siwertach [Sv] i jest najczęściej używanym typem dawki; wszędzie tam, gdzie mówi się o dawce dla człowieka, domyślnie chodzi o dawkę skuteczną.

Co ciekawe jednostki grej i siwert są stosunkowo młode. Ich historycznymi przodkami były odpowiednio rad (*radiation absorbed dose*) i rem (*roentgen equivalent man*). Z kolei urządzenie służące do pomiaru dawki promieniowania nazywamy **dozymetrem**. Dozymetry są to mierniki promieniowania wyskalowane w taki sposób, aby informować o wartości otrzymanej dawki.

W ochronie radiologicznej najczęściej używa się dawki skutecznej w odniesieniu całorocznym [mSv/rok]. Z kolei dozymetry pokazujące aktualny („na żywo”) poziom promieniowania wyskalowane są najczęściej w mikrosiwertach na godzinę [$\mu\text{Sv/h}$]. Dawka dzielona przez czas nosi nazwę **mocy dawki**.



Rys. Dozymetr pokazujący moc dawki promieniowania gamma równą 2,4 $\mu\text{Sv/h}$ (w odniesieniu do dawki skutecznej); zdjęcie wykonano na pokładzie samolotu pasażerskiego, 11 km nad ziemią; po wylądowaniu moc dawki spadła do ok. 0,15 $\mu\text{Sv/h}$ (15 razy), czyli do naturalnego poziomu promieniowania na ziemi [fotografia własna autora]

Pojęcia dawki i mocy dawki (patrz rysunek) są bardzo często mylone i źle interpretowane. Aby nie popełniać błędów, pamiętajmy o tym, że:

- pojęcie dawki odnosi się do promieniowania **już zaabsorbowanego** przez organizm;
- **poziom promieniowania** w danym miejscu określa się za pomocą **mocy dawki**, czyli dawki mierzonej w czasie, np. 10 mGy/h, 20 mSv/h, 0,2 $\mu\text{Sv/s}$;
- aby obliczyć otrzymaną dawkę należy pomnożyć moc dawki przez czas przebywania;
- odpowiedniej dawce odpowiada analogiczna moc dawki, np. moc dawki pochłoniętej, moc dawki równoważnej, moc dawki skutecznej etc.;
- często moc dawki określa się symbolem $\dot{D}$, czyli pierwszej pochodnej dawki po czasie.

Na koniec w tabelce poniżej zestawiono różne wielkości dozymetryczne, ich jednostki oraz sposoby przeliczania jednych na drugie.

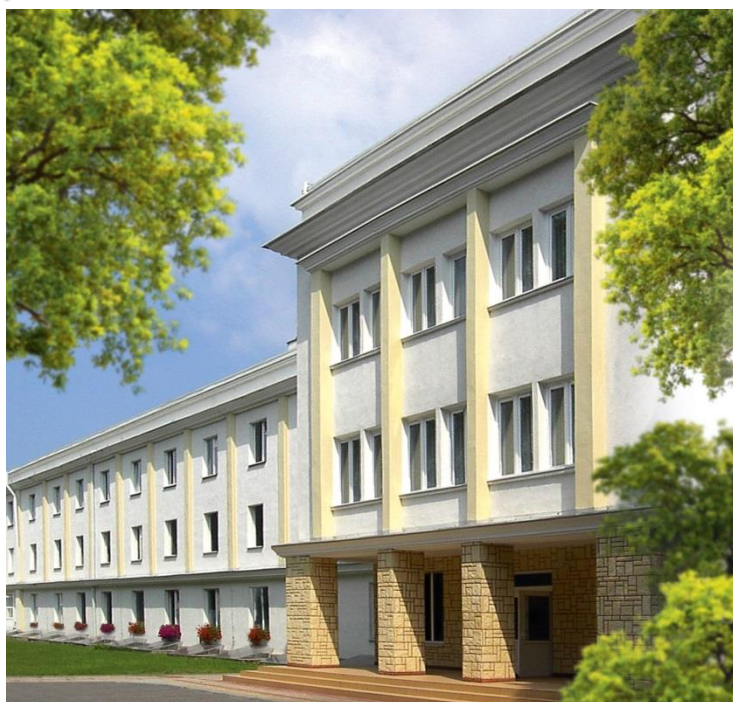
Wielkość	Oznaczenie	Jednostka	Przeliczniki
Aktywność	A	Bq Ci*	1 Bq = 1 rozpad / sek 1 Ci = 37 GBq
Stężenie promieniotwórcze	S	Bq/kg Ci/kg*	j.w.
Dawka ekspozycyjna (ekspozycja) ^a	X	C/kg R*	1 R = 0,258 mC/kg 1 R = 0,00876 Gy ^a
Moc dawki ekspozycyjnej (moc ekspozycji) ^a	$\dot{X}$	C/(kg s) R/s* nA/kg*	1 nA/kg = 0,1224 mGy/h
Dawka pochłonięta	D	Gy rad*	1 Gy = J / kg 1 rad = 0,01 Gy
Moc dawki pochłoniętej	$\dot{D}$	Gy/s rad/s*	j.w.
Dawka równoważna	H	Sv rem*	1 Sv = J / kg 1 rem = 0,01 Sv
Moc dawki równoważnej	$\dot{H}$	Sv/s rem/s*	j.w.
Dawka efektywna (skuteczna)	E	Sv rem*	j.w.
Moc dawki efektywnej (skutecznej)	$\dot{E}$	Sv/s rem/s*	j.w.
Energia	E	J kWh eV	1 J = N m = W s 1 kWh = 3,6·10 ⁶ J 1 J = 6,24·10 ¹⁸ eV
Moc	P	W	1 W = J / s

* jednostka dawna, obecnie coraz mniej spotykana

^a dotyczy promieniowania elektromagnetycznego w powietrzu

Daniel Jankowski
Specjalista ds. dozymetrii
POLON-ALFA Sp. z o.o. Sp.k.

PRZENOŚNE DETEKTORY PROMIENIOWANIA JONIZUJĄCEGO NA PRZYKŁADZIE APARATURY DOZYMTRYCZNEJ POLON-ALFA.



Przez ostatnie stulecie byliśmy i cały czas jesteśmy świadkami pasjonującego rozwoju możliwości wykorzystania promieniowania jonizującego przez człowieka w wielu dziedzinach począwszy od medycyny nuklearnej, poprzez radiografię przemysłową, datowanie materiałów jak też mierniki grubości bądź zapylenia. Człowiek swoimi zmysłami nie jest w stanie stwierdzić obecności promieniowania jonizującego ani tym bardziej oszacować, jaki jest jego poziom. Naprzeciw tym wymaganiom wychodzi aparatura dozymetryczna zapewniająca podstawową ochronę radiologiczną jak i pozwalająca na przeprowadzenie skomplikowanych pomiarów dotyczących właściwości promieniowania jonizującego.

POLON-ALFA Spółka z ograniczoną odpowiedzialnością Sp.k. od ponad 50 lat rozbudowuje pozycję lidera w branży aparatury dozymetrycznej. Jest dobrze znana zarówno na rynku polskim, jak i na rynkach zagranicznych. W okresie półwiecza, od zakładu badawczo-doświadczalnego, opracowującego unikalną aparaturę do pomiaru promieniowania jonizującego, rozszerzając asortyment i częściowo zmieniając profil produkcji oraz rozwijając moce produkcyjne, POLON-ALFA przerodził się w największego obecnie w Polsce producenta systemów sygnalizacji pożarowej oraz aparatury dozymetrycznej.

Lata pięćdziesiąte obecnego stulecia stanowiły ogromny przełom w dziedzinie techniki. Doświadczenia minionego okresu II wojny światowej i jej następstwa stawiały przed ludzkością, równoległe z perspektywą kataklizmu atomowego, realną możliwość wykorzystania energii jądrowej w codziennym życiu. Te przesłanki stały się podstawą szerokiego zainteresowania dziedziną techniki jądrowej, której starano się wyznaczyć bardziej znaczącą rolę niż jedynie środka masowego niszczenia, tym bardziej, że z naukowego punktu widzenia istniały możliwości jej wszechstronnego zastosowania ku pożytkowi człowieka.

Określone warunki w tym czasie w naszym kraju, powszechne poparcie dla postępu techniki w ogóle, dały asumpt do utworzenia wyspecjalizowanej jednostki organizacyjnej, której podstawowym kierunkiem działania miało być miernictwo w zakresie promieniowania jonizującego. Instytucją wiodącą w tym zakresie był początkowo Instytut Tele-Radiotechniczny (ITR) w Warszawie, w którego gestii, jak również kierunku prac naukowych leżały te zagadnienia, stanowiąc jednak tylko fragment bardzo szerokiej tematyki.

O wyborze Bydgoszczy na miejsce usytuowania tego nowego Zakładu przesądził fakt, że w Zakładach Wyrobów Elektrotechnicznych „ELTRA” prowadzona była pokrewna produkcja związana z obronnością kraju. Tu, więc w 1956 roku rozpoczęto pracę nad zorganizowaniem instytutowego Zakładu Radiometrii.

Nowopowstały Zakład Radiometrii był jednostką organizacyjną o charakterze naukowo-badawczym, w której nie przewidywano podejmowania szerszych działań o charakterze produkcyjnym. Stąd wykonywane prace były raczej opracowaniami jednostkowymi, mając jednak już wyraźne zastosowanie praktyczne.

W kwietniu 1957 roku przekształcono oddział Instytutu, zajmujący już wtedy teren i budynek przy ul. Glinki w Bydgoszczy, w Zakład Doświadczalny ITR.

W latach 1957-1959 zwiększał się stopniowo potencjał produkcyjny jednostki, rosła załoga, a realizowane zagadnienia techniczne dostosowywano do tworzącej się w kraju nowej dziedziny, jaką była technika jądrowa.

Z początkiem roku 1962, z inicjatywy i przy zdecydowanych staraniach pracowników zakładu, podporządkowano dotychczasowy wydział ZWE „ELTRA” utworzonemu w tym czasie w Warszawie Biuru Urzędzeń Techniki Jądrowej.

W następstwie tych zmian Zakład realizował prace w zakresie techniki jądrowej, jako swoje zagadnienia podstawowe wynikające z branżowej przynależności organizacyjnej. W nowym układzie organizacyjnym Zakład podlegał resortowo Pełnomocnikowi Rządu ds. Wykorzystania Energii Jądrowej. Dawało to m.in. możliwość bliższej współpracy z branżowymi jednostkami badawczymi, w tym szczególnie z Centralnym Laboratorium Ochrony Radiologicznej w Warszawie oraz Instytutem Badań Jądrowych w Świerku.

Nowy układ organizacyjny, jak również postęp czasu wywarł istotny wpływ na sytuację i warunki produkcyjne w Zakładzie.

Poszerzył się znacznie asortyment wyrobów. Program produkcyjny wszedł w nowe dziedziny. Stosowana technika wykonawcza coraz skuteczniej wprowadzała nowe zdobycze: elementy półprzewodnikowe, schematy drukowane i układy zminiaturyzowane, wypierając dotychczas powszechnie stosowaną konwencjonalną technikę montażu elementów radiotechnicznych, czy też lampy elektronowe.

Zakład stawał się samodzielną jednostką przemysłową, całkowicie opanowując wszystkie fazy prac badawczo-rozwojowych, wdrożeniowych i produkcyjnych.

Bardzo istotnym elementem rozwoju Zakładu była budowa laboratorium fizyczno-chemicznego, wyposażonego w ławy pomiarowe i stanowiska kalibracyjne, posiadające źródła promieniowania o wysokiej aktywności, rentgenowską aparaturę przemysłową oraz komplety źródeł kalibracyjno-probiecznych do badań i skalowania wyrobów.

Rozbudowa Zakładu obejmowała także prace, które w powiązaniu z odpowiednimi zmianami organizacyjnymi, pozwalały na wyodrębnienie pomieszczeń m.in. dla urzędów do wykonywania sitodruku do opisywania płyt czołowych produkowanych wyrobów, wykonywania chemigrafii i produkcji schematów drukowanych.

W tych nowych warunkach zanikał stopniowo doświadczalny charakter Zakładu; coraz silniej uzewnętrzniały się cechy zakładu produkcyjnego, rządzącego się skonkretyzowanymi planami produkcyjnymi wynikającymi z własnych planów badawczo- rozwojowych, planowanymi wskaźnikami ekonomicznymi itp.

Taki charakter Zakładu utrzymała uprzednia reorganizacja jednostki nadrzędnej, a w jej następstwie również Zakładu.

W roku 1970 dotychczasowa jednostka organizacyjna stała się Zakładem Urzędów Dozymetrycznych w Zjednoczonych Zakładach Urzędów Jądrowych „POLON”.

Po tej reorganizacji szczebla nadrzędnego, Zakład - pośrednio, jako jednostka Zjednoczonych Zakładów Urzędów Jądrowych - był od lat siedemdziesiątych członkiem międzynarodowego zrzeszenia „Interatominstrument”. Pozwalało to na realizowanie na szerszą skalę przedsięwzięć w ramach współpracy międzynarodowej, zarówno w odniesieniu do nawiązywania kontaktów w zakresie prac naukowo-badawczych, jak i w produkcji eksportowej.

W czasie 30 lat (do roku 1986) Zakład Urzędów Dozymetrycznych, rozwijając systematycznie swą bazę techniczną osiągnął na tyle wysoki poziom produkcji, przy zatrudnieniu około 530 osób, że wyrobami swoimi wypełniał całkowicie zapotrzebowanie krajowe w dziedzinie aparatury pomiarowej w zakresie techniki jądrowej, produkując równocześnie na użytek innych branż wyroby, które dotychczas pozyskiwano z importu. W dziedzinie produkcji Zakładu do lat 90-tych dominujące miejsce zajmowała aparatura radiometryczna wykonywana kompleksowo, tj. z przynależnym wyposażeniem i sprzętem współpracującym.

Podstawowymi elementami tej grupy przyrządów pomiarowych były radiometry i dawkomierze oraz związane z nimi sondy detekcyjne, jak również osprzęt pomocniczy. Zasadniczy szereg radiometrów stanowiły: radiometry uniwersalne, mierniki skażeń i uniwersalne radiometry laboratoryjne. Wymienione typy przyrządów i dalsze stanowiły szeregi produktowe opracowane i produkowane w kilku odmianach. Popularnym wyrobem były radiometry, tzw. kieszonkowe, będące dość powszechnym przedmiotem eksportu. Wykonanie specjalne stanowiły radiometry górnicze.

Dla celów laboratoryjnych produkowano szereg radiometrów i monitorów komorowych oraz dawkomierzy. Do tej pokaźnej grupy urządzeń i przyrządów pomiarowych dochodziły wyroby z tzw. urządzeń i przyrządów nie katalogowych, wykonywane na zamówienie specjalne, w tym szczególnie rentgenometri noszone, rentgenometri sygnalizacyjne i urządzenia do pomiaru skażeń terenu.

Tu szczególnie należy wymienić monitor skażeń terenu, który zdalnie, z obiektów latających (np. śmigłowiec) mierzył z wysokości bezpiecznych dla pilota, faktyczne skażenia odniesione do powierzchni ziemi. W podobnych warunkach inny zespół urządzeń mierzył skażenia z pojazdów naziemnych lub pływających.

Laboratoryjne dawkomierze sygnalizacyjne, dawkomierze osobiste (komorowe, termoluminescencyjne i radiofotoluminescencyjne), sygnalizatory progowe oraz dawkomierze terapeutyczne, a dalej urządzenia odczytowe do dawkomierzy indywidualnych uzupełniały tę grupę produkowanych przyrządów pomiarowych. Łącznie w okresie 1967 do 1996 Zakład wykonał ponad 14.300 szt. radiometrów i dawkomierzy różnych typów.

Produkowane sondy pomiarowe stanowią element detekcyjny przystosowany do wszystkich występujących rodzajów promieniowania jonizującego, przeznaczony do użytku w różnych warunkach środowiskowych i spełnienia różnych funkcji: do pomiaru skażeń w warunkach laboratoryjnych i przemysłowych, przy kontroli pomieszczeń reaktorów jądrowych, do pomiarów próbek radioaktywnych, do pomiarów skażeń cieczy, w tym również wody w otwartych zbiornikach itd. Sondy te wraz z przynależnym wyposażeniem stanowiły grupę ponad 60 wyrobów.

W latach 1967 do 1996, w okresie największego zapotrzebowania na te urządzenia pomiarowe, wyprodukowano w Zakładzie prawie 12.300 szt. sond różnych typów i odmian.

W początkowym okresie działania Zakładu opracowano konstrukcyjnie i wykonano w krótkich seriach o przeznaczeniu typowo laboratoryjnym: urządzenia koincydencyjne, układy opóźniające impulsy, generatory impulsów nanosekundowych, analizatory impulsów (jednokanałowe), urządzenia do koncentracji aerozoli, izotopowy miernik objętości krwi w żywym organizmie, czy też zestaw do pomiaru jodochwytności tarczycy.

Opracowano także i produkowano jednostkowo lub w krótkich seriach defektoskopy do badania elementów rurowych i płyt stalowych oraz przenośny defektoskop ze źródłem o dużej aktywności (manipulowany zdalnie) m.in. do badania zbrojenia w konstrukcjach żelbetowych. Przenośny izotopowy miernik poziomu cieczy pozwalał wykonywać pomiar ilości ciekłego gazu w stalowych butlach do gazów przemysłowych lub w gaśnicach przeciwpożarowych. Dla przemysłu wydobywczego (kopalnie węgla) opracowano i wyprodukowano niewielkie serie przekaźników izotopowych, które stanowiły elementy automatycznie sterowanych urządzeń kopalnianych - szczególnie w kopalniach na zautomatyzowanych ścianach wydobywczych.

W latach 1978-1991 Zakład podjął i zrealizował, w ramach współpracy krajów byłego RWPG, przygotowanie technologiczne i wdrożył do produkcji urządzenia systemu kontroli bezpieczeństwa radiacyjnego „Sejwał” dla elektrowni jądrowych.

To kompleksowe urządzenie systemowe, składające się z ponad 25 typów wyrobów, stanowiło wyposażenie elektrowni jądrowych w niektórych byłych krajach socjalistycznych. W latach 1983 do 1992 Zakład wykonał 10 zestawów tych urządzeń w łącznej liczbie około 2 tys. szt. wyrobów.

Podsumowując ten, z konieczności skrótowy opis historii Zakładu, podkreślić należy jednak szczególnie, że znakomitą większość opracowań, z bardzo nielicznymi wyjątkami, stanowiły wyniki własnych prac badawczo-konstrukcyjnych Zakładu, własne pełne opracowanie i przygotowanie technologiczne, łącznie z oprzyrządowaniem produkcyjnym i wdrożeniem do produkcji.

Stąd już wynika konkluzja, że program konstrukcyjno-wdrożeniowy Zakładu zawierał bardzo liczne opracowania innowacyjne będące wyrazem twórczej myśli pracowników Zakładu, potwierdzone patentami i to nie tylko krajowymi. Wiele z nich zostało opatentowanych również poza krajem, potwierdzając w ten sposób wyłączność stosowania zawartych w naszych wyrobach koncepcji technicznych, przynosząc również określone korzyści ekonomiczne autorom patentów i Zakładowi.

W okresie 40-lecia Polski Urząd Patentowy udzielił Zakładowi 62 patenty na wynalazki i prawa ochronne na 5 wzorów użytkowych, które zostały zastosowane w kraju. Zakład posiadał również udzielony patent z prawem stosowania za granicą. Aktualnie w Urzędzie Patentowym znajduje się zgłoszone do oceny 8 opracowań. Świadectwa autorskie na wynalazki i wzory użytkowe otrzymało 52 twórców - pracowników naszego Zakładu.

Podobnie liczne wyroby poza zdobytą popularnością wśród użytkowników, wyróżniane były na wystawach i targach technicznych w kraju i za granicą, wspominając choćby tylko nagrodę KNiT-u (miernik objętości krwi), nagrodę MON (radiometr lotniczy), nagrodę Bydgoskich Targów SAWO (centralka sygnalizacji pożarowej), jak również nagrodę na targach zagranicznych w Pławdiw w Bułgarii (system przeciwpożarowy).

W swej 40 letniej historii Zakład współpracował z wieloma placówkami naukowo-badawczymi, w tym również z zagranicy. Podkreślając ten fakt wymienić należy w pierwszej kolejności Instytut Tele-Radiotechniczny w Warszawie, Instytut Badań Jądrowych w Świerku k. Otwocka, Wojskowy Instytut Chemii i Radiometrii w Rembertowie, Instytut Fizyki Jądrowej w Krakowie, Instytut Techniki Jądrowej przy AGH w Krakowie, Instytut Onkologii w Warszawie, Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej w Warszawie, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu, Przemysłowy Instytut Telekomunikacji w Warszawie, Instytut Mechaniki Precyzyjnej w Warszawie, Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Ochrony Przeciwpożarowej w Józefowie k. Warszawy i inne.

Kolejna zmiana utworzyła Zakład Urządzeń Dozymetrycznych w Zjednoczonych Zakładach Urządzeń Jądrowych „POLON”, a na początku 1991 r. powołano przedsiębiorstwo państwowe ZUD POLON-ALFA. Od połowy roku 1995, po najbardziej istotnej zmianie organizacyjnej w następstwie gospodarczych zmian strukturalnych w kraju, Zakład jest spółką pracowniczą z ograniczoną odpowiedzialnością, jako Zakład Urządzeń Dozymetrycznych POLON-ALFA Sp. z o.o. z większościowym udziałem akcjonariatu pracowniczego. Od 2011 roku firma wchodzi w skład holdingu AAT wiodącego importera oraz dystrybutora zabezpieczeń elektronicznych w Polsce jako Polon Alfa Spółka z ograniczoną odpowiedzialnością Spółka komandytowa.¹

Obecnie oferta firmy POLON-ALFA w zakresie aparatury dozymetrycznej obejmuje zarówno radiometri przenośne, aparaturę laboratoryjną, sondy jak też specjalistyczny sprzęt przeznaczony dla służb mundurowych. POLON-ALFA jest również producentem stacjonarnych monitorów prom. Jonizującego, instalowanych na przejściach granicznych, złomowiskach, w zakładach utylizacji odpadów i wielu innych placówkach.



Radiometr RK-100

Najczęściej wykorzystywanym radiometrem przenośnym w ramach podstawowej ochrony radiologicznej jest **radiometr RK-100** wraz z sondą zewnętrzną (opcja).

Jest on przeznaczony do:

- Pomiaru skażeń powierzchni substancjami alfa, beta i gamma promieniotwórczymi;
- Pomiaru mocy przestrzennego równoważnika dawki promieniowania X i gamma;
- Pomiaru mocy dawki promieniowania X i gamma.

Prosta i bardzo trwała obudowa, mała masa i łatwa obsługa umożliwiają szerokie stosowanie przyrządu przy wykrywaniu źródeł promieniowania i ocenie poziomu skażeń oraz jako przyrządu pomiarowego wszędzie tam, gdzie stosuje się źródła promieniowania.

Wysoka funkcjonalność radiometru jest odzwierciedlona w licznych jego zastosowaniach:

- Kontrola szczelności zamkniętych źródeł promieniotwórczych znajdujących się w różnych urządzeniach (np.: jonizacyjna czujka dymu, miernik grubości, waga izotopowa, defektoskop, miernik zapylenia powietrza itp.);
- Pomiar mocy dawki przy urządzeniach wytwarzających promieniowanie jonizujące (np.: spektrometr XRF, aparat RTG);
- Dydaktyka pomiarów dozymetrycznych dla studentów, stażystów (pracownie fizyczne, chemiczne, fizyki medycznej, dydaktyczne, ochrony radiologicznej, dozymetrii, medycyny nuklearnej)
- Stwierdzenie zawartości substancji promieniotwórczych w tamponach używanych do odkażania powierzchni stołów roboczych lub sprzętu w pracowniach laboratoryjnych;
- Kontrola skażeń promieniotwórczych (powierzchni np.: rąk, odzieży roboczej, stołów roboczych w inspektoratach sanitarno – epidemiologicznych, pracowniach radiobiologicznych oraz pracowniach medycyny nuklearnej itd.);
- Sprawdzenie skuteczności osłon przed promieniowaniem jonizującym w pracowniach: Z, O, RTG, CT;
- Ocena narażenia zewnętrznego personelu na stanowiskach pracy (np.: zakłady przemysłowe, laboratoria, gabinety dentystyczne, weterynaryjne, pracownie fizyki medycznej itd.);
- Wytyczenie granic terenu nadzorowanego, terenu kontrolowanego oraz strefy awaryjnej;
- Monitorowanie warunków pracy z możliwością bezpośredniego odczytu mierzonych wartości i sygnalizacji przekroczenia ustawionych progów alarmowych;
- W kontroli granicznej i celnej oraz służbach ratownictwa technicznego;
- Do kontroli skażeń oraz pomiaru mocy przestrzennego równoważnika dawki w transporcie kolejowym i drogowym.

Wyposażeniem opcjonalnym **radiometru RK-100** jest sonda zewnętrzna, która umożliwia pomiar skażeń powierzchni substancjami alfa, beta i gamma promieniotwórczymi oraz promieniowania X. W ofercie znajduje się również adapter USB-IrDA pozwalający na komunikację **radiometru RK-100** z komputerem. Oprogramowanie zainstalowane na komputerze pozwala na odczyt danych tabelarycznych i wykresów jak też zmianę niektórych parametrów urządzenia (wartość progów alarmowych).

Radiometry te nie wymagają przeglądów serwisowych. Niemniej jednak istnieje możliwość przeprowadzenia wzorcowania i dostarczenie Świadectwa Wzorcowania przez Laboratorium Wzorcujące Urządzeń Dozymetrycznych przy POLON-ALFA (Akredytowane Laboratorium Wzorcujące Nr AP 109).

Wzorcowanie zamówionych przyrządów może być wykonane przed ich wysyłką do klienta lub po dostarczeniu do Laboratorium w późniejszym terminie. Świadectwo wzorcowania dla **radiometru RK-100** - wzorcowanie w funkcji mocy przestrzennego równoważnika dawki w zakresie od 3 mSv/h do 7 mSv/h w polu promieniowania gamma Cs-137 (energia promieniowania ok. 662 keV).

Faktem godnym uwagi jest to, że **radiometr RK-100** spełnia wymagania dotyczące sprzętu dozymetrycznego zgodnie z rozporządzeniem Rady Ministrów z dnia 23.12.2002 R. w sprawie wymagań dotyczących sprzętu dozymetrycznego (Dz. U. Nr 239, poz. 2032).

Radiometr uniwersalny RUM-2



Rozwiązaniem pozwalającym na szersze pomiary właściwości radioizotopów jest **radiometr RUM-2**, który jest uniwersalnym urządzeniem pomiarowym umożliwiającym podłączenie do komputera i zbieranie danych z różnych sond radiometrycznych produkcji POLON-ALFA oraz innych źródeł sygnałów impulsowych. Zakres zastosowań obejmuje analizę ilościową częstości impulsów, analizę

spektrometryczną rozkładu statystycznego wysokości impulsów, analizę czasową zdarzeń, sterowanie urządzeniami zewnętrznymi lub pomiary sterowane urządzeniami zewnętrznymi.

Przyrząd umożliwia współpracę z większością sond produkowanych dotychczas przez POLON-ALFA, w tym najbardziej popularnych SSU-3-2, SSU-70, SSA-1P, SPNT-3 i rodziną sond licznikowych SGB. Dzięki bogatemu zestawowi wejść i wyjść możliwe jest też podłączenie innych źródeł sygnału.

Radiometr nie posiada własnego wyświetlacza oraz żadnych elementów manipulacyjnych - całość sterowania odbywa się z komputera typu PC. Oprogramowanie komputerowe jest integralną częścią radiometru i jest ono niezbędne do pracy z radiometrem.

Radiometr RUM-2 może być wykorzystywany m.in. w takich aplikacjach jak:

- Stwierdzenie obecności substancji promieniotwórczych w próbce (np.: odpady medyczne, popioły, nawozy, materiały budowlane, żużel, odpady przemysłowe, gleba, materiały biologiczne)
- Dydaktyka pomiarów dozymetrycznych dla studentów, stażystów (pracownie fizyczne, chemiczne, fizyki medycznej, dydaktyczne, ochrony radiologicznej, dozymetrii, medycyny nuklearnej)
- Kontrola szczelności zamkniętych źródeł promieniotwórczych w różnych urządzeniach (np.: miernik grubości, waga izotopowa, defektoskop, miernik zapylenia powietrza);
- Umożliwia pomiar względnej aktywności próbek (jodochwytność tarczycy);
- Analiza spektrometryczna izotopów;
- Kontrola skażeń promieniotwórczych (powierzchni np.: rąk, odzieży roboczej, powierzchni stołów roboczych w laboratoriach przemysłowych, inspektoratach sanitarno – epidemiologicznych, pracowniach radiobiologicznych oraz pracowniach medycyny nuklearnej itd.);



- Stwierdzenie zawartości substancji promieniotwórczych w tamponach używanych do odkażania powierzchni stołów roboczych lub sprzętu w pracowniach laboratoryjnych;
- Sprawdzenie skuteczności osłon przed promieniowaniem jonizującym w pracowniach: Z, O, RTG, CT.

Radiometr uniwersalny RUM-2 może być urządzeniem dydaktycznym, dzięki któremu istnieje możliwość przeprowadzenia wielu doświadczeń fizycznych w pracowniach i laboratoriach (fizyki, fizyki medycznej, medycyny nuklearnej, ochrony radiologicznej, dozymetrii, chemii, ochrony środowiska, biologii itd.). Na stronie

internetowej www.polon-alfa.pl znajdują się przykładowe ćwiczenia dydaktyczne realizowane w oparciu o **radiometr RUM-2**. Poza tym oprogramowanie jest wyposażone w tryb demonstracyjny pozwalający na zapoznanie się z wybranym zestawem funkcji radiometru. Wersja demo oprogramowania udostępniona jest za darmo na stronie internetowej POLON-ALFA.



Sondy scyntylacyjne.

W swojej ofercie POLON-ALFA posiada również szereg sond scyntylacyjnych, które współpracują zarówno z dawną jak i obecną aparaturą radiometryczną.

Sondy scyntylacyjne uniwersalne SSU-70-2 oraz SSU-3-2 przeznaczone są do pomiarów radiometrycznych promieniowania alfa, beta, X i gamma, przy użyciu odpowiednio wybranych scyntylatorów. Są szczególnie przydatne do pomiaru próbek substancji emitujących promieniowanie jonizujące. Dzięki bogatemu wyposażeniu, umożliwiają wykonywanie większości pomiarów w laboratoriach naukowo-badawczych, przemysłowych, medycznych, radiobiologicznych itp. Sondy przystosowane są do współpracy ze wszystkimi uniwersalnymi radiometrami produkcji POLON-ALFA (URL-1, URL-2, URS-3, RUST-2, RUST-3, RUM-1, RUM-2).

Prosta i trwała budowa, bogate wyposażenie, mała masa i łatwa obsługa umożliwiają szerokie stosowanie sond przy pomiarze aktywności próbek, identyfikacji radioizotopów itp.

Są szczególnie przydatne:

- do pomiaru aktywności próbek substancji emitujących promieniowanie alfa, beta i gamma w szerokim zakresie energii;
- do pomiarów spektrometrycznych próbek emiterów promieniowania X i gamma;
- do kontroli zawartości substancji promieniotwórczych w tamponach używanych do odkażania skażonych powierzchni stołów roboczych lub sprzętu w pracowniach radioizotopowych;
- do pomiaru małych intensywności promieniowania X i gamma.

Sonda scyntylacyjna SSA-1P jest przeznaczona do pomiaru skażeń powierzchni substancjami alfa promieniotwórczymi. Jest ona przystosowana do współpracy ze wszystkimi radiometrami produkcji POLON-ALFA (URL-1, URL-2, URS-3, RUST-2, RUST-3, RUM-1, RUM-2). Stosowana przy wykrywaniu i pomiarze skażeń powierzchni, wszędzie tam gdzie stosuje się źródła promieniowania alfa.



Jest ona szczególnie przydatna do:

- kontroli szczelności źródeł (np. w jonizacyjnych czujkach dymu);
- kontroli skażeń rąk, odzieży roboczej, powierzchni stołów roboczych w pracowniach radioizotopowych;
- przez inspektorów ochrony radiologicznej.

Monitor promieniowania gamma PM-1401M.

Do kontroli obecności promieniowania jonizującego oraz wykrywania i lokalizacji źródeł promieniowania możemy wykorzystać **monitor promieniowania gamma PM-1401M**. Szczególną cechą przyrządu jest możliwość nastawiania progu sygnalizacji w polu promieniowania względem rejestrowanej aktualnie mocy dawki, co umożliwia lokalizację źródeł. Stanowi on ważny element uzupełniający dla stacjonarnego monitora promieniowania na złomowiskach oraz w zakładach unieszkodliwiania odpadów, ponieważ pozwala na odseparowanie skażonych elementów z większej ilości złomu bądź odpadów.

Dzięki małym wymiarom i masie, hermetycznej budowie, odporności na wstrząsy oraz bardzo wysokiej czułości, jest on szczególnie przydatny, jako wyposażenie funkcjonariuszy Służb Celnych oraz Straży Granicznej, przy kontroli granicznej wszelkiego rodzaju ruchu towarów i osób w celu wykrycia nielegalnego przewozu materiałów promieniotwórczych. Sygnalizator może być również bardzo pomocny, jako wyposażenie służb ratownictwa technicznego do kontroli miejsc wypadków, wyposażenie obrony cywilnej, służby celnej, granicznej oraz straży pożarnej.

Charakterystyczne cechy monitora:

- umożliwia pomiar mocy równoważnika dawki $H^*(10)$ Sv/h odniesionej do skolimowanej wiązki promieniowania ^{137}Cs ;
- pozwala na lokalizację źródeł prom. X oraz gamma;
- Blok detekcji oparty jest na czułym scyntylicytorze CsJ/Tl zapewniającym Krótki czas reakcji;
- sygnalizacja świetlna oraz dźwiękowa przekroczenia ustawionych progów alarmowych;
- w celu przeglądania miejsc trudno dostępnych oraz pełnego wykorzystania jego czułości, monitor jest mocowany na specjalnym wysięgniku teleskopowym (wyposażenie opcjonalne);
- wysięgnik posiada gniazdo, umożliwiające podłączenie elementu wibracyjnego, pozwalającego na sygnalizację obecności źródła promieniowania w środowisku, w którym występuje duży hałas;
- prosta obsługa za pomocą dwóch klawiszy funkcyjnych;
- poziom tła automatycznie ustalany jest po włączeniu miernika lub na żądanie użytkownika;
- hermetyczna obudowa zapewniająca wysoką odporność na wodę i zanieczyszczenia (IP65);
- podświetlanie wyświetlacza;
- po włączeniu następuje automatyczna kontrola sprawności przyrządu sygnalizując wszelkie ewentualne niesprawności
- możliwość zapamiętania wartości mierzonych wielkości w pamięci nieulotnej;
- przyrząd jest wyposażony w klips, umożliwiający noszenie go na pasie;
- niskie zużycie energii – jedna bateria typu Ir6AA zapewnia pracę do 800 godzin.

Na uwagę zasługuje fakt, że **monitor promieniowania gamma PM-1401M** posiada certyfikat ITRAP, potwierdzający zgodność parametrów technicznych przyrządu z wymaganiami Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej w Wiedniu.

Wykrywacz kontrabandy PM-1703T



W przypadkach wykrywania przemytu narkotyków, papierosów i innych towarów, ukrytych w samochodach osobowych, ciężarowych, wagonach oraz innych obiektach nieocenioną pomocą jest **wykrywacz kontrabandy PM-1703T**. Odbywa się to poprzez wykrywanie niejednorodności gęstości wypełnienia ukrytych pustych przestrzeni za różnymi przegrodami, lub wewnątrz dowolnych zamkniętych przestrzeni za płytami poszycia wagonów kolejowych, samochodów, kontenerów, za ścianami budynków itp.

Urządzenie składa się z korpusu, wyposażonego w rękojeść, w którym mocuje się **monitor PM-1401M** oraz źródło promieniowania gamma, które jest tak usytuowane i osłonięte, że moc dawki promieniowania na zewnętrznej powierzchni urządzenia jest znacznie mniejsza od wartości dopuszczalnej. Emisja kwantów gamma w kierunku kontrolowanej objętości ma miejsce tylko w czasie pomiaru.

Pojemnik z kolimatorem zapewnia ochronę obsługującego detektor przed promieniowaniem gamma źródła i ograniczenie strefy napromienienia. W strefie napromienienia następuje wzajemne oddziaływanie pierwotnego promieniowania gamma emitowanego przez źródło z materiałem badanego obiektu. W wyniku wzajemnego oddziaływania tworzy się wtórne, rozproszone promieniowanie gamma, które jest rejestrowane przez **monitor promieniowania gamma PM-1401M**. Wynik pomiaru jest wskazywany na WCK (wskaźnik ciekłokrystaliczny). Na podstawie zmiany wskazań na WCK można sądzić o zmianie gęstości badanego obiektu.

Radiometr DPO



Dla klientów posiadających koncesję MSWiA w zakresie obrotu wyrobami i technologią o przeznaczeniu wojskowym bądź policyjnym posiadamy w naszej ofercie **radiometr DPO**. W zależności od konfiguracji jest przeznaczony do pomiaru równoważnika dawki i mocy równoważnika dawki promieniowania X i gamma. Urządzenie umożliwia również wykrywanie i pomiar stopnia skażenia powierzchni nuklidami

alfa, beta i gamma promieniotwórczymi. Zakres pomiarowy radiometru zapewnia możliwość jego wykorzystania zarówno w warunkach pokoju [pomiar: środowiskowe, na stanowisku pracy oraz niskich poziomów promieniowania (ang. low-level radiation)], jak i podczas konfliktu zbrojnego z użyciem broni nuklearnej [pomiar: bardzo dużych mocy dawek do 50 Sv/h].

Radiometr DPO może być instalowany nie tylko w stałych obiektach obronnych i ochronnych o przeznaczeniu militarnym, punktach dowodzenia, lecz również może stanowić podstawowy sprzęt dozymetryczny, użytkowany na pokładach okrętów i obiektów pływających Marynarki Wojennej

oraz w pojazdach mechanicznych i wozach bojowych. Zapewniona jest również możliwość jego wykorzystania na pokładach samolotów i śmigłowców w części kabinowej.

W wersji podstawowej (panel pomiarowy z sondą/sondami), radiometr może być wykorzystany jako specjalistyczny, przenośny przyrząd rozpoznania i pomiaru skażeń promieniotwórczych.

W chwili obecnej radiometr może być wyposażony w dwa typy sond:

- sonda do pomiaru promieniowania X i gamma w szerokim zakresie mocy dawki,
- sonda do pomiaru skażeń nuklidami alfa, beta i gamma promieniotwórczymi.

Radiometr DPO spełnia założenia norm wojskowych NO-42-A204:2005 (wojskowe przyrządy radiometryczne) oraz NO-06-A108:2005 (Uzbrojenie i sprzęt wojskowy. Ogólne wymagania techniczne. Metody kontroli i badań. Metody oceny zgodności z wymaganiami konstrukcyjnymi.)

Oprócz w/w urządzeń konstruktorzy POLON-ALFA ciągle pracują nad nowymi rozwiązaniami, które w niedalekiej przyszłości pozwolą poszerzyć naszą ofertę urządzeń dozymetrycznych.

¹ 1957 – 1997 – 40 lat techniki jądrowej w Bydgoszczy – *Biuletyn Polon Alfa Zakład Urządzeń Dozymetrycznych Sp. z o.o.* – Bydgoszcz 1997 r.

Piotr Czerski

„OBSZAR OGRANICZONEGO UŻYTKOWANIA” WOKÓŁ ELEKTROWNI JĄDROWEJ

Obszar ograniczonego użytkowania wokół elektrowni jądrowej - cóż to takiego? Jak sama nazwa wskazuje, jest to obszar z jakichś względów OGRANICZONY. Warto przeanalizować, jakie są tego konsekwencje konfrontując zapisy prawne z praktyką ustanowionych już w Polsce obszarów ograniczonego użytkowania (OOU).

Jak to jest z tymi obszarami ograniczonego użytkowania w praktyce?

Lotnisko na Okęciu w Warszawie taki obszar ma. I obiecuje w związku z tym, że jak komuś mieszkającemu tam jest za głośno, to przyśle komisję, która zbada czy hałasy startujących samolotów przekraczają państwowe normy. Jeśli tak to pomogą wyciszyć mieszkanie¹ (jest to jedynie dobra wola przedsiębiorstwa poprawiającego „klimat akustyczny”, a nie postanowienie uchwały). Sejmik województwa mazowieckiego ustanowił OOU, bo: „oddziaływanie akustyczne lotniska na środowisko nadal znacznie wykracza poza teren, do którego Przedsiębiorstwo Państwowe Porty Lotnicze posiada tytuł prawny.... Wynika to głównie ze specyfiki hałasu lotniczego, gdzie źródła hałasu oddziałują na tereny położone wokół lotniska z różnych wysokości, bez możliwości ich wyciszenia lub osłonięcia. Jedynymi metodami zmniejszenia oddziaływania akustycznego są działania planistyczne oraz organizacyjne w postaci specjalnych, antyhałasowych procedur startów i lądowań. Z tego względu konieczne jest utworzenie dla Portu Lotniczego im. Fryderyka Chopina w Warszawie obszaru ograniczonego użytkowania”. W obszarze tym wydzielono strefy, w których ze względu na wzmożony hałas wprowadzono „działania planistyczne” polegające na ograniczeniach dla budownictwa mieszkaniowego oraz na zakazie budowy szkół, przedszkoli, szpitali i domów opieki społecznej. Ograniczenia te dotyczą tylko fragmentu OOU. Ograniczenia dotyczą też możliwości rozwoju lotniska. Z chwilą utworzenia OOU zarządzający lotniskiem zobowiązany jest też do prowadzenia działalności w taki sposób, aby nie powodowała ona przekroczeń dopuszczalnych poziomów hałasu lotniczego poza granicami tego obszaru. Zasięg ponadnormatywnego hałasu generowanego w wyniku startów, lądowań mieścić się musi w granicach OOU.

Zgodnie z ideą tworzenia obszarów ograniczonego użytkowania, na terenie OOU wokół Lotniska Chopina dopuszcza się występowanie przekroczeń dopuszczalnych poziomów hałasu, z tego tytułu mieszkańcy mają prawo ubiegać się o rekompensatę od P.P. „Porty Lotnicze”. W efekcie przeprowadzenia rozpraw sądowych w latach 2012-13 wydano kilka orzeczeń przyznających właścicielom nieruchomości odszkodowania. Związane są one ze spadkiem ich wartości rynkowych i pokryciem kosztów prac wygłuszających hałas. Wartość tych odszkodowań (ich przyznanie możliwe jest z mocy prawa jedynie w wyniku orzeczenia sądowego) w 2013 roku osiągnęła poziom półtora mln zł.² Mieszkańcy uważają, że w praktyce w obszarze ograniczonego użytkowania nie obowiązują ograniczenia hałasowe, lecz jedynie ograniczenia i obowiązki właścicieli i użytkowników tego

¹ [1] strona internetowa lotniska Chopina w Warszawie

² [2] strona internetowa organizacji: Nasze Małe Ojczyzny Stowarzyszenie Przyjaciół Przeźmierowa i Baranowa

terenu, a uchwała samorządu terytorialnego drastycznie ogranicza prawa i sposób korzystania z własności przez mieszkańców na rzecz realizacji komercyjnych celów przez P.P. „Porty Lotnicze”.

Warto też zwrócić uwagę, że **ograniczenia związane są z przekroczeniem norm hałasu, a nie ze wzrostem zagrożenia potencjalnymi katastrofami lotniczymi.**

Nie bez kłopotów przebiega utworzenie OOU dla podobnego przypadku - dla lotniska Ławica pod Poznaniem. Uchwalenie jego utworzenia w obecnej wersji zostało zaskarżone przez lokalną organizację - Stowarzyszenia Przyjaciół Przeźmierowa i Baranowa (uznano ją za fatalną). Mimo tego zostało ono zatwierdzone przez Generalną Dyрекcję Ochrony Środowiska. Ograniczenia są podobne, co dla przypadku warszawskiego Okęcia. Krótki czas (dwa lata) zgłaszania roszczeń i projekt rozbudowy lotniska spotkał się z protestem mieszkańców. Problemem jest też charakter i wielkość rekompensat. Lotnisko szacuje swoje możliwości finansowe związane z prowadzeniem prac wygłuszających hałas w mieszkaniach na kilkadziesiąt milionów zł. Tymczasem organizacje reprezentujące mieszkańców szacują spadek wartości nieruchomości w OOU na miliard zł.³ O takiej wartości odszkodowań nie chce słyszeć lotnisko, mimo, że prawo stanowi: „w związku z ograniczeniem sposobu korzystania z nieruchomości jej właściciel może żądać odszkodowania za poniesioną szkodę; szkoda obejmuje również zmniejszenie wartości nieruchomości” oraz „obowiązany do wypłaty odszkodowania lub wykupu nieruchomości jest ten, którego działalność spowodowała wprowadzenie ograniczeń w związku z ustanowieniem obszaru ograniczonego użytkowania”⁴.

Protesty wystąpiły też przy ustaleniu OOU dla drogi wojewódzkiej nr 184. Tym razem zarządca drogi wniósł o stwierdzenie nieważności jednego z punktów uchwały Rady Powiatu, który zobowiązywał dla OOU, (gdy hałas był zbyt duży) do wymiany okien w ścianie budynku ustawionej frontem do drogi na okna o podwyższonej izolacyjności akustycznej. Brak jednolitych przepisów dla dróg różnych kategorii spowodował zaistnienie sporu.⁵

Utworzenie OOU nie likwiduje więc konfliktów i problemów prawnych.

Jaka jest idea tworzenia obszarów ograniczonego użytkowania?

Ustawa „Prawo ochrony środowiska” nie zawiera jasnego sformułowania, więc różni autorzy dają różne odpowiedzi, które zebrane są w specjalnej publikacji⁶. Spośród szeregu definicji można wybrać na przykład stwierdzenie, że utworzenie OOU ma za swój cel wykluczenie szkodliwych skutków dla zdrowia ludzi oraz dla środowiska powodowanych przez przekroczenie standardów oraz umożliwienie dalszej działalności zakładu, dla którego został utworzony. Wiąże się to z wprowadzeniem dla OOU specjalnego reżimu prawnego polegającego na tym, że na jego terenie nie muszą być dotrzymywane standardy, jakości środowiska. Oznacza to, że dany zakład może dalej funkcjonować (nie zostanie zamknięty), mimo niespełnienia wymogu dotrzymywania standardów. Jak wynika z analizy pojęcia obszaru ograniczonego użytkowania u podstaw tworzenia takiego obszaru leży w istocie konflikt pomiędzy dwiema wartościami. Z jednej, bowiem strony w grę wchodzi ochrona środowiska, a z drugiej ochrona określonych praw majątkowych. Zauważyć też można elementy innych wartości konstytucyjnych, takich jak ochrona wolności działalności

³ [3] Media o nas, Telewizja WTK, 20.04.2012, Odszkodowania dla mieszkańców Ławicy cz. 1 i 2

⁴ [4] Prawo ochrony środowiska (Dz. U. z 2008 r. Nr 25, poz. 150 ze zm.) Art. 129 oraz 136 ust. 2

⁵ [5] Materiały z konferencji RDOŚ „Obszar ograniczonego użytkowania w teorii i praktyce”, 9.10.2012 r., Poznań

⁶ [6] B. Rakoczy „Obszar ograniczonego użytkowania w prawie polskim” wyd. Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych o/Wielkopolski, Warszawa 2011

gospodarczej i ochrona zdrowia i życia ludzkiego. Ochrona wolności działalności gospodarczej następuje pośrednio poprzez ochronę praw majątkowych, a ochrona życia i zdrowia ludzkiego poprzez ochronę środowiska.

Zgodnie z Prawem ochrony środowiska „niemożność dotrzymania standardów jakości środowiska” związana była z hałasem, nieprzyjemnymi zapachami oraz silnymi polami elektromagnetycznymi. Pierwsze wymienione niedogodności dotyczą sąsiedztwa lotnisk, autostrad, torów kolejowych, wysypisk śmieci, oczyszczalni ścieków i kompostowni. Niedogodności związane z życiem na dotkniętym nimi terenie są odczuwane przez nasze zmysły i mogą przeszkadzać. Innym problemem jest niebezpieczeństwo dla zdrowia związane z ochroną przed silnymi polami elektromagnetycznymi, co wiąże się z sąsiedztwem instalacji radiowych, linii wysokiego napięcia i stacji transformatorowych. Tutaj zagrożenie jest bardziej podstępne, bo jest niewyczuwalne dla zmysłów. O jego istnieniu można się dowiedzieć czyniąc pomiary wyspecjalizowanym sprzętem. Przekroczenie określonych limitów może być niebezpieczne dla zdrowia.

Wspólnym mianownikiem dla wymienionych oddziaływań (hałasu, zapachu i pól elektromagnetycznych) jest przekraczanie dozwolonych wartości w normalnych warunkach eksploatacyjnych. W tych warunkach przekraczane są wyznaczone normy - normy związane z niebezpieczeństwem dla zdrowia. Nie bierze się tutaj pod uwagę sytuacji awaryjnych tzn. katastrof lotniczych, wybuchów transformatorów itp.

Obszar ograniczonego użytkowania wokół elektrowni jądrowej

Wyjątkiem jest obszar ograniczonego użytkowania tworzony wokół elektrowni jądrowej. Jego granice są ustalane przy uwzględnieniu mało prawdopodobnych awarii, które teoretycznie mogą się wydarzyć.

Chociaż „eksploatacja przedsięwzięcia nie spowoduje przekroczenia standardów jakości środowiska”, tzn. mieszkanie obok elektrowni nie jest niezdrowe ani dokuczliwe Prawo atomowe nakazuje: „wokół obiektu jądrowego tworzy się obszar ograniczonego użytkowania /.../”⁷. Ponieważ tworzony on jest na zasadach określonych w Prawie ochrony środowiska, to podobnie jak w przypadku przekroczenia norm hałasu ograniczenia na nim obowiązujące uchwała sejmik. Określone zostają granice obszaru (potrzebna pozytywna opinia Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki), wymagania techniczne dotyczące budynków i sposób korzystania z terenu.

Obszar ograniczonego użytkowania wokół elektrowni jądrowej ma również chronić samą elektrownię przed zagrożeniami wynikającymi z prowadzonej w jej okolicy działalności gospodarczej⁷ o czym mówi Prawo atomowe.

Warunki przy normalnej eksploatacji

Prawo Atomowe w art.36f narzuca na OOU ograniczenie by w czasie normalnej eksploatacji EJ roczna dodatkowa dawka na jego granicy nie przekroczyła 0,3 mSv (milisiwerta), czyli mniej więcej jednej dziesiątej dawki, jaką otrzymuje się w Polsce ze źródeł naturalnych⁷. Tymczasem przy płocie współcześnie budowanych elektrowni jądrowych otrzymuje się dawkę wielokrotnie mniejszą od tej wyznaczonej przepisami.

⁷ [8] L.Dobrzyński i in., *Spotkanie z promieniotwórczością*, IPJ w Świerku, maj 2005

Tak, więc pozostając przy tym ograniczeniu tworzenie OOU przy elektrowni jądrowej byłoby bezpodstawne.

Usprawiedliwieniem dla tworzenia obszarów ograniczonego użytkowania jest włączenie w zakres normalnej eksploatacji przypadków tzw. „przewidywanych zdarzeń eksploatacyjnych”. Są one zdefiniowane, jako procesy odbiegające od normalnej eksploatacji, które wystąpić mogą, co najmniej raz podczas okresu eksploatacji, ale nie spowodują dzięki zastosowania odpowiednich rozwiązań projektowych znacznych uszkodzeń, ani nie doprowadzą do powstania warunków awaryjnych.⁸

Takim przypadkiem jest, np. nagłe nieprzewidziane wyłączenie turbiny.

Dla poszczególnych rozwiązań konstrukcyjnych reaktorów oraz całych elektrowni zestaw „przewidywanych zdarzeń eksploatacyjnych” może być różnorodny i konsekwencją takich zdarzeń (mówiąc potocznie zakłóceń) może być wzrost poziomu promieniowania. **Poziom radiacji nie może jednak wykroczyć poza ustalony na granicy OOU limit 0,3 mSv/rok, co należy sprawdzić na drodze odpowiednich analiz.**

Awarie EJ, a granice Obszaru Ograniczonego Użytkowania

Prawo atomowe włącza skutki potencjalnych awarii, jako podstawę do wyznaczenia granic OOU nie tylko poprzez zdarzenia eksploatacyjne. Jest to napisane w przepisie mówiącym, że „**poza OOU w razie awarii bez stopienia rdzenia** roczna dawka skuteczna (efektywna) od wszystkich dróg narażenia **nie może przekroczyć 10 mSv**”⁹. Awariami bez stopienia rdzenia są wszystkie „awarie projektowe”, tzn. warunki awaryjne obiektu jądrowego uwzględnione w projekcie obiektu jądrowego, w których uszkodzenie paliwa oraz uwolnienia substancji promieniotwórczych są utrzymywane w ustalonych granicach¹⁰. Awariami bez stopienia rdzenia są również „sekwencje złożone” stanowiące część „rozszerzonych warunków projektowych”¹¹ niebędących „ciężkimi awariami”¹² (awariami, które prowadzą do znaczącej degradacji rdzenia reaktora, a nawet jego stopienia). Tak, więc dla wytyczenia granic OOU należy nie tylko obliczyć konsekwencje radiologiczne wszystkich awarii projektowych, ale również sekwencji złożonych. Należy określić dla jakiej odległości od reaktora dawki roczne w wypadku ich wystąpienia osiągną wartość wspomnianych 10 mSv. Sekwencje złożone to sekwencje zdarzeń wykraczające poza sekwencje przyjęte w założeniach projektowych (deterministycznych) mogące potencjalnie prowadzić do znaczących uwolnień substancji promieniotwórczych do środowiska, lecz nieprowadzące do stopienia rdzenia reaktora. Są one efektem uszkodzeń urządzeń lub błędów operatora.¹³

Rozporządzenie projektowe wymienia następujące sekwencje złożone, które bezwzględnie należy uwzględnić¹⁴:

⁸ Prawo atomowe, Art. 3 pkt. 39a)

⁹ Prawo atomowe Art. 36f pkt2.2)

¹⁰ Prawo atomowe, Art. 3 pkt. 1a)

¹¹ [9] Rozporządzenie projektowe § 1. pkt 22

¹² Prawo atomowe, Art.3. pkt 2a), [13] Rozporządzenie w sprawie analiz bezpieczeństwa, Załącznik nr 1

¹³ Rozporządzenie projektowe § 1. pkt 24

¹⁴ Rozporządzenie projektowe § 30.

- Przewidywane stany przejściowe bez awaryjnego wyłączenia reaktora mogące prowadzić do uwolnień substancji promieniotwórczych poza pierwotną obudowę bezpieczeństwa;
- Całkowity zanik zasilania elektrycznego prądem przemiennym;
- Awarie związane z ominięciem obudowy bezpieczeństwa;
- Całkowita utrata funkcji systemu wody zasilającej;
- Rozerwanie rurociągu obiegu chłodzenia reaktora, z jednoczesną utratą jednego ciągu systemu awaryjnego chłodzenia rdzenia;
- Niekontrolowany spadek poziomu wody podczas pracy z obniżonym poziomem wody podczas remontu lub przeładunku paliwa w reaktorze;
- Całkowita utrata funkcji systemu pośredniego chłodzenia urządzeń jądrowych;
- Utrata możliwości odprowadzania ciepła do ostatecznego ujścia (odbiornika) ciepła;
- Niekontrolowane rozcieńczenie kwasu borowego w reaktorze wodno-ciśnieniowym;
- Rozerwanie wielu rurek wymiany ciepła w wytwornicy pary reaktora wodno-ciśnieniowego.

Czy na tym kończy się lista analiz awarii potrzebnych dla wyznaczenia granic OOU, czy też należy analizować kategorię jeszcze mniej prawdopodobnych awarii?

Jest to przedmiotem sporów dotyczących interpretacji przepisów. Prawo atomowe określające obszar ograniczonego użytkowania w Art. 36f pkt. 2.2) zostało uzupełnione w § 9. Pkt. 2. Rozporządzenia projektowego dodatkowym warunkiem obejmującym wszystkie rozszerzone warunki projektowe (tzn. też ciężkie awarie, których efektem jest duża degradacja paliwa, w tym stopienie rdzenia reaktora, ale bez uszkodzenia obudowy bezpieczeństwa reaktora).

Napisano tam, że projekt obiektu jądrowego zapewnia ograniczenie uwolnień substancji promieniotwórczych poza obudowę bezpieczeństwa reaktora w razie zaistnienia warunków awaryjnych, tak żeby w przypadku wystąpienia rozszerzonych warunków projektowych nie było konieczne podejmowanie wczesnych ani długoterminowych działań interwencyjnych **poza granicami OOU** obiektu jądrowego.¹⁵

Wczesne działania interwencyjne, to działania związane z ewakuacją ludności, podejmowane w oparciu o przewidywaną dawkę promieniowania dla okresu do 7 dni. Ewakuacja jest zarządzana, gdy dawka ta wynosi 100 mSv.¹⁶

Długoterminowe działania interwencyjne - działania związane ze stałym przesiedleniem ludności, (gdy przewidywana dawka w ciągu całego życia przekracza 1000 mSv), długotrwały zakaz lub ograniczenie spożywania skażonej żywności i skażonej wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi, żywienia zwierząt skażonymi środkami żywienia zwierząt i pojenia skażoną wodą oraz wypasu zwierząt na skażonym terenie.¹⁷

Uwzględniając § 9. Pkt. 2. rozporządzenia projektowego należy, więc przeanalizować czy wymienione dawki nie będą przekroczone poza granicą OOU w wypadku wymienionych tam awarii.

Zakres wymaganych analiz

Jak z powyższego omówienia wynika wyznaczenie granicy OOU wymagać, więc będzie znajomości wyników przeprowadzonych i zweryfikowanych analiz bezpieczeństwa dla różnego rodzaju warunków awaryjnych². Zrozumiałe jest, więc, że potrzebna tu będzie wymagana przepisami pozytywna opinia Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki. Jej otrzymanie bez Wstępnego Raportu

¹⁵ Rozporządzenie projektowe § 9. pkt 2.

¹⁶ [10] Rozp. w sprawie wartości poziomów interwencyjnych § 1 pkt 1.1), Rozp. projektowe § 1. pkt 37.

¹⁷ Rozp. w sprawie wartości poziomów interwencyjnych § 1.pkt 1.6), Rozp. projektowe § 1. pkt 3.

Bezpieczeństwa wybranej technologii reaktorowej oraz ewentualnych dodatkowych analiz może okazać się niemożliwe. Przepisy Prawa atomowego¹⁸ mówią, bowiem wyraźnie, że przy szacowaniu dawki „uwzględnia się dane i informacje dotyczące parametrów obiektu jądrowego, w tym jego konstrukcji i stosowanych środków bezpieczeństwa, przewidywanych wartości uwolnień substancji promieniotwórczych do otoczenia w warunkach normalnej eksploatacji, w czasie przewidywanych zdarzeń eksploatacyjnych i w warunkach awaryjnych... ”.

Dla każdej lokalizacji wyniki będą różne. Przy szacowaniu dawki powinno się uwzględniać dane dotyczące lokalizacji obiektu jądrowego. Dane te mają zawierać warunki środowiska przyrodniczego istniejącego w rejonie obiektu jądrowego, obejmujące w szczególności: ukształtowanie terenu, budowę geologiczną, warunki klimatyczne (z uwzględnieniem najbardziej niekorzystnych warunków meteorologicznych), hydrologiczne, zagospodarowanie gruntów oraz powierzchniowych wód płynących i stojących w rejonie obiektu jądrowego.

Dokumentacja będąca podstawą do wyznaczenia obszaru ograniczonego użytkowania z racji wymaganej przepisami pozytywnej opinii Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki musi mieć, jakoś odpowiadającą dokumentacji bezpieczeństwa.

Ograniczenia dotyczące Obszaru Ograniczonego Użytkowania w pobliżu elektrowni jądrowej

Osobnym zagadnieniem są ograniczenia, którym podlegać ma obszar ograniczonego użytkowania. W toku normalnej eksploatacji, jak wiemy współczesna elektrownia jądrowa nie stanowi dla nikogo zagrożenia, jeśli chodzi o promieniowanie. Tym niemniej w przepisach¹⁹ obowiązujących przed nowelizacją Prawa atomowego w 2011 r. na obszarze ograniczonego użytkowania nie było dopuszczalne:

- wznoszenie budynków mieszkalnych i innych obiektów przeznaczonych na stały pobyt ludzi oraz obiektów użyteczności publicznej;
- prowadzenie upraw przeznaczonych do spożycia lub wypasu;
- prowadzenie działalności gospodarczej niezwiązanej z działalnością obiektu jądrowego;

Obecnie określenie istnienia granicy OOU nie powoduje konsekwencji ograniczających jego użytkowania, takie konsekwencje powstają dopiero w wyniku ustaleń Sejmiku. Istnieje zagrożenie, że wymienione ograniczenia mogą być automatycznie przeniesione z poprzednio obowiązujących przepisów. W obowiązującym Prawie atomowym przewiduje się ograniczenia, które mogą dotyczyć w szczególności wznoszenia budynków mieszkalnych, budynków zamieszkania zbiorowego, budynków użyteczności publicznej, a także wykonywania działalności gospodarczej niezwiązanej z działalnością obiektu jądrowego, lecz co warto podkreślić: „mogącej niekorzystnie wpłynąć na obiekt jądrowy”²⁰. Tak jak sprawa granic OOU, tak i określenie ograniczeń w zakresie przeznaczenia terenu, wymagań technicznych dotyczących budynków i sposobu korzystania z terenu, w tym ocena oddziaływania wykonywanej działalności gospodarczej na obiekt jądrowy, wymaga pozytywnej opinii Prezesa PAA.

Przy określaniu założeń projektowych dla obiektu jądrowego uwzględnia się takie czynniki jak rozkład zaludnienia wokół obiektu. Ma to znaczenie w przypadku tzw. działań interwencyjnych w strefie planowania awaryjnego, obejmującej teren większy niż obszar ograniczonego użytkowania.

¹⁸ Prawo atomowe Art. 36f pkt 3.

¹⁹ [11] Rozporządzenie Min. Środowiska z dnia 30.12.2002 r. , § 4.

²⁰ Prawo atomowe Art. 36g

Działania te należą do grupy działań średnioterminowych podejmowanych w razie awarii poważniejszych niż awarie projektowe. Są to działania związane z czasowym przesiedleniem ludności, podejmowane w oparciu o projekcję dawek promieniowania od powierzchni skażonego terenu i wtórnie zawieszonych aerozoli dla okresu do 30 dni, które mogą być wdrożone po praktycznym zakończeniu awaryjnych uwolnień substancji promieniotwórczych.²¹

Producenci reaktorów na rynek europejski starają się spełnić założenia projektowe EUR (wymagania europejskiego przemysłu jądrowego). Zgodnie z nimi zakłada się, że w razie „rozszerzonych warunków projektowych” poważniejsze skutki radiologiczne ograniczone są do strefy o promieniu 800 m od reaktora (odpowiada to OOU), co wymagać może podjęcia na tym terenie wczesnych i długoterminowych działań interwencyjnych, natomiast średnioterminowe działania interwencyjne ogranicza się do strefy o promieniu 3 km od reaktora (odpowiada to strefie planowania awaryjnego). W razie awarii projektowych nie będzie konieczne podejmowanie jakichkolwiek działań interwencyjnych poza strefą 800m.²²

Konkluzje

Z przedstawionych rozważań wynika, że sprawa określenia granic OOU wokół elektrowni jądrowej nie jest sprawą prostą. Może wymagać przeprowadzenia analiz bezpieczeństwa i określenia dawek również dla ciężkich awarii prowadzących do stopienia rdzenia włącznie (bez uszkodzenia obudowy bezpieczeństwa reaktora).

Ograniczenia obowiązujące w OOU dla EJ nie są jasno określone. Doświadczenia z wyznaczaniem OOU przy innych obiektach niż jądrowe wskazują, że przeciwnicy inwestycji wykorzystywać będą wszelkie możliwości prawne, by sprawę opóźnić i zatrzymać.

Podstawą do wyznaczenia granic OOU musi, więc być dobrze przygotowana dokumentacja bezpieczeństwa związana z wybieraną technologią reaktorową i analizowaną lokalizacją, odpowiadająca warunkom narzuconym przez dozór jądrowy, trudna w zanegowaniu przez organizacje przeciwnie budowie elektrowni. Ich wpływ na lokalny samorząd może być znaczący.

Formalne wyznaczenie OOU powoduje konsekwencje finansowe dla właściciela EJ – konieczność wypłaty odszkodowań bądź wykupu nieruchomości o ile z takim wnioskiem wystąpiliby właściciele nieruchomości leżących w OOU²³.

Z kolei właścicielom nieruchomości zagraża szereg ograniczeń wynikających z sąsiedztwa elektrowni jak na przykład niemożność prowadzenia różnego rodzaju działalności gospodarczej. Biorąc pod uwagę interes społeczny władze państwowe wszystkich szczebli powinny dążyć, by w otoczeniu elektrowni powstały satysfakcjonujące mieszkańców plany zagospodarowania przestrzennego. Plany te powinny w maksymalnym stopniu zaspokajać potrzeby i interesy mieszkańców, by pozyskać ich poparcie dla budowy elektrowni jądrowej.

²¹ Rozporządzenie projektowe § 1. pkt 30 i 33

²² [12] W. Kielbasa *Przepisy i rekomendacje ...* ,

²³ [4] Prawo Ochrony Środowiska, Art.136 pkt 2

Literatura:

- [1] strona internetowa lotniska Chopina w Warszawie
<http://www.odpowiedzialnelotnisko.pl/index.php> (dostęp 5.7.2013)
- [2] strona internetowa organizacji: Nasze Małe Ojczyzny Stowarzyszenie Przyjaciół Przeźmierowa i Baranowa <http://przezmierowo.org/> (dostęp 5.7.2013)
- [3] Media o nas, Telewizja WTK, 20.04.2012, Odszkodowania dla mieszkańców Ławicy cz.1 i 2
http://przezmierowo.org/?page_id=300 (dostęp 11.7.2013)
- [4] Prawo ochrony środowiska (Dz. U. z 2008 r. Nr 25, poz. 150 ze zm.) Art. 129 oraz 136 ust. 2
<http://prawo.lego.pl/prawo/ustawa-z-dnia-27-kwietnia-2001-r-prawo-ochrony-srodowiska/> [5]
Materiały z konferencji RDOŚ „Obszar ograniczonego użytkowania w teorii i praktyce”, 9.10.2012r., Poznań
- [6] B.Rakoczy „Obszar ograniczonego użytkowania w prawie polskim” wyd. Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych o/Wielkopolski, Warszawa 2011
- [7] Prawo atomowe , tekst jednolity z 24 stycznia 2012, Dz.U. 2012 poz.264
Art.36 f, Art. 36g pkt. 2, Art. 3 pkt. 39a), Art.3. pkt 2a), Art. 36f pkt 3, Art. 36g
<http://isap.sejm.gov.pl/DetailsServlet?id=WDU20120000264>
- [8] L.Dobrzyński i in., Spotkanie z promieniotwórczością, IPJ w Świerku, maj 2005
(Tab.2, <http://www.radioaktywnosc.umcs.lublin.pl/?id=3>)
- [9] Rozp.R.Min. z dnia 31.8.2012 r. (Dz.U.2012 poz.1048) w sprawie wymagań bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej, jakie ma uwzględniać projekt obiektu jądrowego, (Rozporządzenie projektowe), § 1. pkt 22, pkt 24, pkt 30, pkt 33, pkt 37, § 30., § 9. pkt 2.
<http://dziennikustaw.gov.pl/DU/2012/1048>
- [10] Rozp.R.Min. z dnia 27.4.2004 r. (Dz.U.2004 nr 98 poz.987) w sprawie wartości poziomów interwencyjnych dla poszczególnych rodzajów działań interwencyjnych oraz kryteriów odwołania tych działań , § 1.
<http://dziennikustaw.gov.pl/DU/2004/s/98/987/1>
- [11] Rozp.Min.Środowiska z 30.12.2002 r. w sprawie szczegółowych zasad tworzenia obszaru ograniczonego użytkowania wokół obiektu jądrowego ze wskazaniem ograniczeń w jego użytkowaniu, Dz.U. 2002 nr 241 poz. 2094, § 4.
http://static1.money.pl/d/akty_prawne/pdf/DU/2002/241/DU20022412094.pdf
- [12] W. Kielbasa Przepisy i rekomendacje krajowych organów regulacyjnych oraz organizacji międzynarodowych związane z wymaganiami bezpieczeństwa i licencjonowaniem dostaw, usług i produkcji urządzeń dla energetyki jądrowej, prezentacja Poznań 2.9.2011,
<http://www.ptc.poznan.pl/files/Przepisy%20i%20rekomendacje%20dot.%20bezpiecze%C5%84stwa%20i%20licencjonowania%20EJ.ppt> , slajd nr14 (dostęp 24.7.2013)
- [13] Rozp.R.Min. z dnia 31.8.2012 r. (Dz.U.2012 poz.1043) w sprawie zakresu i sposobu przeprowadzania analiz bezpieczeństwa przeprowadzanych przed wystąpieniem z wnioskiem o wydanie zezwolenia na budowę obiektu jądrowego, oraz zakresu wstępnego raportu bezpieczeństwa dla obiektu jądrowego
(Rozporządzenie w sprawie analiz bezpieczeństwa)
§ 4. pkt 1. , Załącznik nr 1
<http://dziennikustaw.gov.pl/DU/2012/1043>

Jerzy Chmielewski

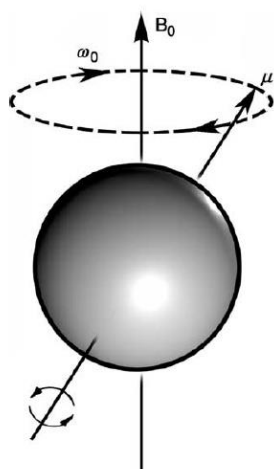
"ATOMOWA" DIAGNOSTYKA MEDYCZNA**Cz. III Metody wykorzystujące Magnetyczny Rezonans Jądrowy**

Nowe ogromne możliwości diagnostyczne dla medycyny otworzyły metody wykorzystujące zjawisko magnetycznego rezonansu jądrowego (NMR - Nuclear Magnetic Resonance). Umożliwia ono obserwowanie struktury tkanek i właściwości płynów w organizmie poprzez rejestrowanie zachowania się jąder atomowych obdarzonych spinem w stałym i zmiennym polu magnetycznym.

Źródeł prowadzących do odkrycia tego zjawiska można doszukiwać się w pracach, które prowadził irlandzki fizyk Sir Joseph Larmor. W dziedzinie rezonansu magnetycznego znane jest równanie "Larmora" mówiące, że częstotliwość precesji (ω) wektora momentu magnetycznego jądra atomowego jest wprost proporcjonalna do iloczynu natężenia pola magnetycznego (B_0) i współczynnika żyromagnetycznego (γ):

$$\omega = \gamma B_0$$

W bardzo dużym uproszczeniu spin jądrowy (związany z wewnętrznym momentem pędu jądra) można sobie wyobrazić jako rotację jądra atomowego wokół własnej osi. Precesję jądra atomowego w polu magnetycznym często porównuje się do ruchu bączka wirującego na podłodze.



Rys. 1 - Precesja jądra atomowego w polu magnetycznym

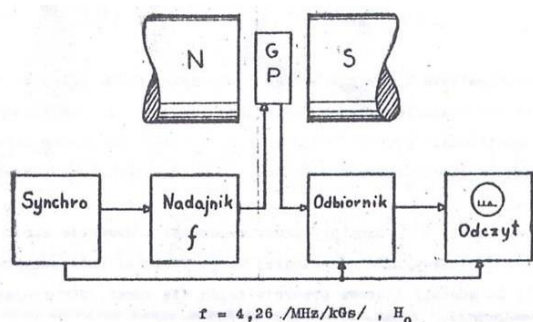
Jądro atomowe precesujące w stałym polu magnetycznym (B_0) można poddać działaniu dodatkowego, zmiennego pola magnetycznego B_1 skierowanego prostopadle do kierunku B_0 . Jeżeli częstotliwość zmiennego pola " f_1 " jest równa częstotliwości precesji jądra " ω ", to następuje dodatkowy jego obrót stosownie do kierunku tego pola. Mówimy wtedy o "rezonansie jądrowym". Częstotliwość rezonansowa " f_1 " jest wprost proporcjonalna do natężenia pola magnetycznego " B_0 ". Współczynnik proporcjonalności jest nazywany "współczynnikiem żyromagnetycznym" i w przypadku wodoru wynosi on 42,6 MHz/T.

Badania zjawisk oddziaływania pól magnetycznych na jądra atomowe były prowadzone w wielu ośrodkach naukowych Anglii, Francji, Niemiec i USA. Na Nowojorskim Uniwersytecie Columbia badania nad właściwościami magnetycznym jąder atomowych zapoczątkował w roku 1930 Izydor Izaak Rabi (który n.b. urodził się w 1898 roku w Rymanowie). Za opracowanie metody pozwalającej na mierzenie właściwości magnetycznych jąder atomowych Rabi otrzymał w 1944 roku Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki. Warto chyba dodać, że w latach 1940 - 1945 pracował on w Massachusetts Institute of Technology (MIT) w zespole zajmującym się konstrukcją radaru.

W roku 1946 dwaj naukowcy: Felix Bloch (z Uniwersytetu Stanford) i Edward M. Purcell (z MIT) niezależnie od siebie wykazali eksperymentalnie, że niektóre jądra atomowe znajdujące się w polu magnetycznym pochłaniają energię elektromagnetyczną, a następnie re-emitują tę energię powracając ze stanu wzbudzonego do normalnego. W ten sposób uzyskali sygnały pochodzące

od jąder wodoru w wodzie i parafinie. Natężenie pola magnetycznego i częstotliwość fal elektromagnetycznych ("radiowych") były zgodne z równaniem Larmora. Za to odkrycie obaj otrzymali Nagrodę Nobla w 1952 roku.

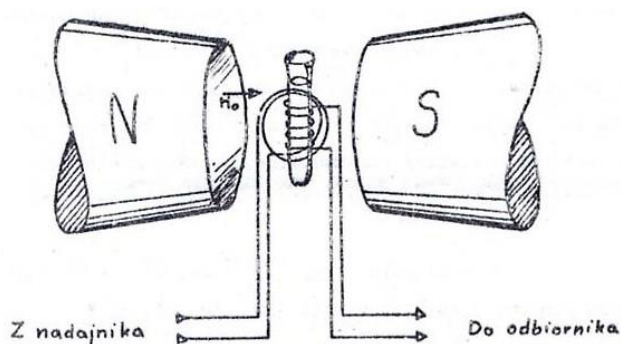
Do obserwacji zjawiska magnetycznego rezonansu jądrowego służy spektrometr składający się z minimum trzech podstawowych elementów: źródła stałego pola magnetycznego, generatora wielkiej częstotliwości i odbiornika fal radiowych o dużej czułości. Potrzebne są również układy sterujące pracą urządzenia oraz rejestrowania, przetwarzania i wizualizacji wyników. Uproszczony schemat spektrometru pokazano na załączonym rysunku.



Rys. 2 - Schemat blokowy aparatury do obserwacji zjawiska MRI

a. - Schemat blokowy

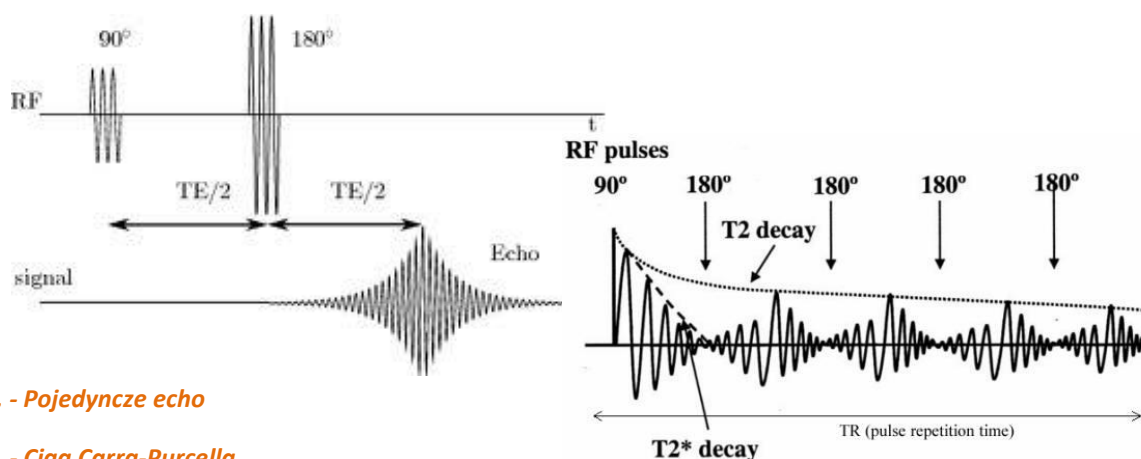
b. - Schemat głowicy pomiarowej z cewkami: nadawczą i odbiorczą



W praktyce wymienione podzespoły są uzupełnione szeregiem dodatkowych, takich jak np. cewki korygujące rozkład pola magnetycznego w celu uzyskania wysokiej równomierności jego natężenia, lub cewki wytwarzające gradienty pola magnetycznego stosownie do wymagań określonych rodzajów pomiarów.

Istotny wkład w metodologię badania zjawisk molekularnych w cieczach wniósł Erwin L. Hahn, który opracował technikę "echa spinowego". Polega ona na pobudzaniu cewek nadawczych impulsami wielkiej częstotliwości ("Larmorowskiej") o odpowiednim czasie trwania. W przypadku klasycznego echa spinowego podawane są dwa impulsy w.c.z. Czas trwania pierwszego impulsu powoduje obrót spinów jądrowych o 90° . Po czasie t podawany jest drugi, dwukrotnie dłuższy impuls, który powoduje obrót spinów o 180° . W efekcie po upływie czasu $2t$ w cewce odbiorczej pojawia się impuls sygnału rezonansu jądrowego, spowodowany powrotem obracanych spinów do stanu początkowego. Technikę "echa spinowego" rozwinęli następnie Herman Carr i Edward Purcell przez stosowanie ciągu wielu impulsów 180° , powtarzających się regularnie w odstępach $2t$. Obecnie jest ona znana pod nazwą "metody CPMG" (akronim nawiązujący do nazwisk twórców metody i jej udoskonaleń: Carr-Purcell-Meiboom-Gill).

Rys.3 - Uzyskiwanie sygnałów "echa spinowego"



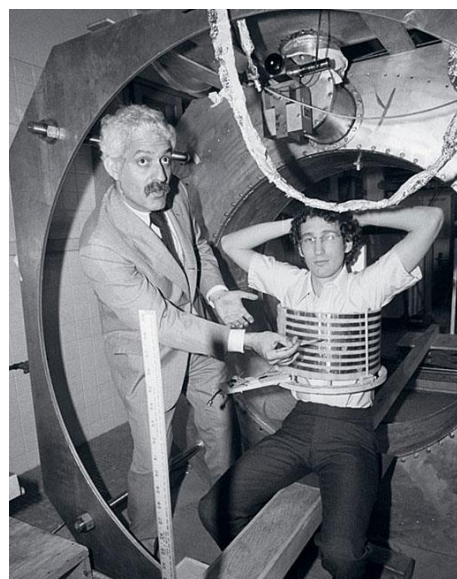
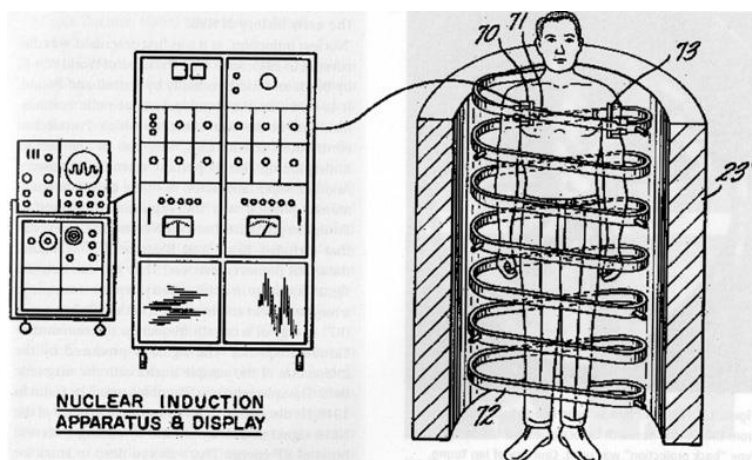
a. - Pojedyncze echo

b. - Ciąg Carra-Purcella

Metody te pozwalają w stosunkowo prosty sposób mierzyć czasy relaksacji T1 i T2 badanych substancji, które dostarczają informacji dotyczących wzajemnych oddziaływań spinów poszczególnych atomów. Obecnie rozwinięta metoda "echa spinowego" stanowi podstawową technikę wykorzystywaną do uzyskiwania obrazów w tomografii MRJ.

Pierwsze eksperymenty ukierunkowane na medyczne wykorzystanie magnetycznego rezonansu jądrowego dostarczały ograniczonej informacji, niejako "jednowymiarowej". Nie można było dokładnie określić z jakiego konkretnie miejsca badanego obszaru pochodzi rejestrowany sygnał. W 1974 roku Paul C. Lauterbur, profesor Nowojorskiego Uniwersytetu w Stony Brook, oraz Peter Mansfield pracujący na Wydziale Fizyki Uniwersytetu w Nottingham niezależnie od siebie zaproponowali ideę stosowania trójwymiarowych gradientów pola magnetycznego do uzyskiwania obrazów przestrzennych, wykorzystując metody wykorzystywane we wspomaganej komputerowo tomografii CAT (Computer Aided Tomography). Lauterbur początkowo nazwał swoją metodę "zeugmatography" (wywodzący się z greckiego "zeugma" - oznaczającego "połączenie"), ale termin ten został zastąpiony powszechnie dziś stosowanym "NMRI - Nuclear Magnetic Resonance Imaging". Obaj naukowcy wspólnie odebrali w roku 2003 Nagrodę Nobla w dziedzinie Fizjologii i Medycyny.

Na początku lat 1970-tych profesor Raymond Vahan Damadian, który pracował w Ośrodku Medycznym Downstate w Brooklinie, dokonał pomiaru czasów relaksacji T1 i T2 normalnej i nowotworowej tkanki pobranej ze szczura. Badanie "in vivo" wykazało, że czasy te są dłuższe w przypadku tkanki nowotworowej, co pozwala na ich rozróżnianie. Kontynuując prace nad wykorzystaniem magnetycznego rezonansu jądrowego Damadian opatentował pierwszy skaner pozwalający na badanie człowieka. Warto wspomnieć, że elektromagnes jego skanera miał już uzwojenia wykorzystujące zjawisko nadprzewodnictwa.



Rys. 4 - Schemat z opisu patentowego wynalazku Raymonda Damadiana

Rys. 4a - Realizacja wynalazku

W 1978 roku Damadian utworzył firmę FONAR Corporation ("FieldFocused Nuclear mAgnetic Resonance"), która w 1980 roku wprowadziła na rynek pierwsze swoje skanery medyczne. Opracowano cały szereg urządzeń, w tym ogromny zestaw FONAR 360⁰ z dwoma ogromnymi okrągłymi nabiegunkami magnesu umieszczonymi na suficie i na podłodze wewnątrz przeznaczonych specjalnie na ten cel pomieszczenia. Natężenie pola magnetycznego w szczelinie wynosiło 0,6T. Konstrukcję urządzenia oparto na opatentowanej technologii Iron-Circuit™. Takie urządzenie zostało zainstalowane w 2005 roku w Nuffield Orthopaedic Centre w Oxfordzie - Anglia. (N.b. opracowano również "przyjazną dla pacjenta" wersję urządzenia OPEN SKY MRI®.)



Rys. 5 - Skaner FONAR 360o

Podana konfiguracja zapewnia pełną swobodę dostępu do strefy pomiarowej ze wszystkich stron. Pacjent ułożony na stole operacyjnym może być umieszczony bezpośrednio pomiędzy obu biegunami magnesu. Dzięki temu zespół operacyjny, składający się z chirurgów, anestezjologów, instrumentariuszek etc., dysponujący niezbędną aparaturą i urządzeniami, ma nieograniczony dostęp do pacjenta ze wszystkich stron i dzięki temu może przeprowadzać skomplikowane operacje. Oczywiście w razie potrzeby w każdej chwili jest do dyspozycji także skaner MRI.

Nawiązując do faktu, że Paul C. Lauterbur oraz Peter Mansfield otrzymali w 2003 roku Nagrodę Nobla z dziedziny Medycyny i Fizjologii "za wykorzystanie rezonansu magnetycznego w medycynie" trudno zrozumieć z jakich powodów Komitet Noblowski nie uwzględnił w tym przypadku Damadiana...(Patrz: *Postscriptum*)

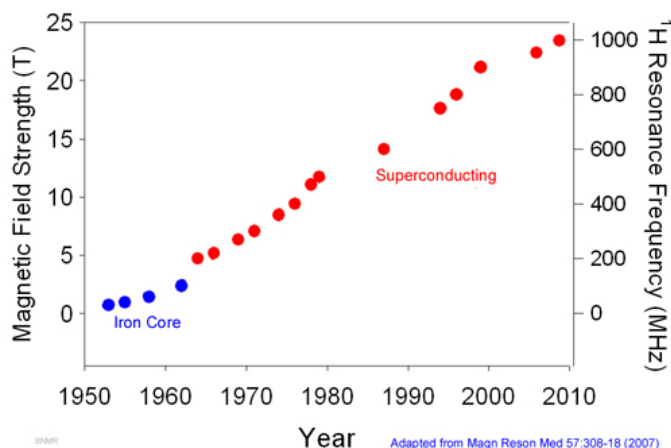
Jak już wiemy, kluczową rolę w badaniach metodami magnetycznego rezonansu jądrowego odgrywa źródło pola magnetycznego. Z teorii wiadomo, że wielkość rejestrowanego sygnału wzrasta odpowiednio do natężenia pola magnetycznego, w którym znajduje się badany obiekt. W szeregu pierwszych eksperymentów do wytwarzania pola magnetycznego w objętości umożliwiającej umieszczenie wewnątrz badanego pacjenta (np. jego głowy) wykorzystywano konstruowane specjalnie elektromagnesy w układzie cewek Helmholtza. Przykładem takiego rozwiązania może być jeden z pierwszych modeli tomografu MRI firmy Bruker z 1983 roku, który pracował z natężeniem pola 0,15T.



Rys. 6 - Tomograf Brukera z cewkami Helmholtza

Istnieją rozwiązania tomografów z nowoczesnymi magnesami ceramicznymi, jednakże dominującą jest tendencja do budowy tomografów mających elektromagnesy z uzwojeniami wykorzystującymi zjawisko nadprzewodnictwa. Uzwojenia w takich magnesach muszą być utrzymywane w

temperaturze ciekłego helu wynoszącej 4,2 K (warto dodać, że w celu zmniejszenia strat ciepła obwody chłodzone ciekłym helem są umieszczane w termostatach chłodzonych z kolei ciekłym azotem o temperaturze 77 K). Najlepszą ilustracją tej tendencji może być wykresu wzrostu natężenia pola magnetycznego i odpowiadającej mu częstotliwości rezonansowej dla wodoru obejmujący lata 1950 - 2010.



Rys. 7 - Wzrost natężenia pola magnetycznego w tomografach MRI

Zwiększenie natężenia pola magnetycznego w tomografach MRI zwiększa amplitudę odbieranych sygnałów rezonansowych, ułatwiając ich rejestrację. Umożliwia to tym samym uzyskiwanie lepszej rozdzielczości przy obrazowaniu badanych organów. Typowy czas trwania badania przy pomocy tomografu MRI wynosi od 20 do 40

minut. Doskonalone są układy sterujące i detekcyjne oraz techniki sterowania gradientami pola magnetycznego, mające na celu znaczne skrócenie czasu badania.

Współczesne tomografy MRI mają przeważnie zbliżoną konstrukcję: toroidalny magnes mieszczący ruchome łożo dla badanego pacjenta oraz nakładane zespoły cewek dostosowane do rodzaju konkretnego badania. Firma Siemens opracowała ostatnio metodę TIM (Total Imaging Matrix) wykorzystującą do 76 zachodzących na siebie cewek odbiorczych i 32 kanały odbioru sygnałów w.cz., która przyspiesza proces gromadzenia danych.



Rys. 8 - Typowy współczesny tomograf MRI - SIEMENS MAGNETOM Trio

Zdarza się jednak, że otwór dla pacjenta wewnątrz toroidalnego magnesu jest zbyt mały dla pomieszczenia otyłych pacjentów, co ogranicza w takim przypadku zakres badań. Istnieją jednak aparaty posiadające większą średnicę otworu.

Firma FONAR oferuje unikalną "stojącą" wersję tomografu "Stand-Up MRI™", umożliwiającą skanowanie pacjenta w pozycji stojącej lub siedzącej na krześle.



Rys. 9 - Tomograf "Stand-Up MRI™", firmy FONAR.

Dzięki wzrostowi mocy obliczeniowej systemów komputerowych i rozwojowi oprogramowania, a zwłaszcza doskonałym algorytmom przetwarzania obrazów wykorzystywane obecnie tomografy MRI pozwalają uzyskiwać obrazy badanych organów będące ogromną pomocą dla lekarzy-specjalistów przy stawianiu diagnozy. Większość obecnie stosowanych skanerów pozwala także na uzyskiwanie obrazu całego ciała pacjenta. Na załączonym zdjęciu pokazujemy obraz MRI całego ciała niemieckiej pływaczki Hannah Stockbauer, która w 2003 roku zdobyła mistrzostwo świata; badanie trwało niecałe 12 minut

Rys. 10 - obraz MRI całego ciała niemieckiej pływaczki Hannah Stockbauer, która w 2003 roku zdobyła mistrzostwo świata; badanie trwało niecałe 12 minut.



Metoda tomografii MRI doskonale uzupełnia od dawna stosowane metody diagnostyczne wykorzystujące promieniowanie jonizujące, takie jak np. klasyczne prześwietlenia rentgenowskie, tomografia komputerowa, czy scyntygrafia. Wszystkie opisane dotychczas metody diagnostyczne wykorzystujące różnego rodzaju promieniowanie elektromagnetyczne dla celów diagnostycznych w medycynie wykazują różnego rodzaju zalety i niedostatki. Żadna z tych metod nie jest w pełni jednoznaczna, ale mogą się one nawzajem uzupełniać, ułatwiając specjalście stawianie trafniejszej diagnozy.

Ostatnio podejmowane są ambitne próby instalowania skojarzonych ze sobą zestawów aparatury do jednoczesnego badania metodami tomografii komputerowej CT, pozytonowej tomografii PET/SPECT wraz z urządzeniami wykorzystującymi magnetyczny rezonans jądrowy. Najbardziej obiecująca jest kombinacja MRI oraz PET. Głównym hamulcem na drodze do jej upowszechniania są znacznie podwyższone koszty takich instalacji. Postęp techniczny następuje jednak bardzo szybko i można oczekiwać, że opisane metody diagnostyczne staną się powszechniej dostępne.

Na zakończenie wypada jeszcze poruszyć bardzo ważną sprawę, związaną z obecnością pola magnetycznego o bardzo dużym natężeniu. Badanie rezonansem magnetycznym nie wymaga wprawdzie zdejmowania z siebie odzieży, jednakże pacjenci powinni w szatni zostawić wszelkie przedmioty metalowe, zegarki, klucze, karty kredytowe i tp. Przeciwwskazaniem do badania może być wszczepiony rozrusznik serca, czy też metalowe implanty. We wszystkich niejasnych przypadkach o możliwości przeprowadzenia badania metodą MRI decyduje lekarz, lub kompetentny specjalistyczny personel przeprowadzający badanie.

Wszelkie przedmioty wykonane z materiałów ferromagnetycznych mogą stanowić poważne zagrożenie. Pole magnetyczne jest bowiem tak silne, że może je wciągnąć włąb tomografu. Dobne przedmioty stalowe, takie jak np. narzędzia, mogą spowodować uszkodzenia uzwojeń, czy też kriostratów elektromagnesu. Znany jest przypadek, kiedy to gaśnica przeciwpożarowa wyrwana z rąk pracownika zabiła dziecko podlegające badaniu. W literaturze fachowej opisywane są przypadki wciągnięcia do magnesu fotelu biurowego, czy nawet łóżka szpitalnego.



Rys. 11 - Fotel biurowy wciągnięty w głąb tomografu siłą pola magnetycznego

Z tych względów całe ruchome wyposażenie pomieszczenia, w którym znajduje się tomograf MRI powinno być wykonane wyłącznie z materiałów niemagnetycznych. Należy pamiętać, że nawet małe przedmioty ferromagnetyczne mogą być równie niebezpieczne, jak duże.

Uszkodzenie układów kriostatycznych również stwarza poważne zagrożenie z uwagi na to, że temperatura ciekłego azotu i ciekłego helu, wykorzystywanych w urządzeniu wynosi odpowiednio 77,4 K oraz 4,2 K. Tak niskie temperatury grożą osobom znajdującym się w pobliżu poważnymi odmrożeniami. W możliwym

do przewidzenia przypadku zaniku nadprzewodnictwa w elektromagnesie konsekwencje mogą być niezwykle poważne.

Na zakończenie warto jeszcze wspomnieć o magnetoencefalografii (MEG). Jest to technika obrazowania elektrycznej czynności mózgu za pomocą rejestracji pola magnetycznego wytworzonego przez mózg. Sygnały są odbierane przez wysokoczułe mierniki pola magnetycznego umieszczone w pobliżu czaszki badanego np. typu SQUID. MEG wykorzystywane jest w badaniach naukowych mających na celu określenie funkcji poszczególnych ośrodków w mózgu; diagnostyce klinicznej, jako badanie wykonywane w trakcie operacji neurochirurgicznych w celu zlokalizowania rejonów patologicznych. Jest to jednak całkiem odrębny temat do omawiania.

Postscriptum. W numerze 426 czasopisma Nature z roku 2005^{*)} ukazał się ciekawy artykuł, którego autorem jest Bryon MacWilliams. Opisano w nim, że w okresie "Zimnej Wojny" młody porucznik Armii Czerwonej Władysław Iwanow pracował nad wykorzystaniem magnetycznego rezonansu jądrowego w wodzie dla potrzeb wojennych. W 1960 roku złożył w Państwowym Komitecie d/s Wynalazków i Odkryć ZSRR zgłoszenie zatytułowane "Metoda badania wewnętrznej struktury ciał materialnych", dotyczące jego idei wykorzystania rezonansu magnetycznego do badania organizmu człowieka. Wychodził przy tym ze słusznego założenia, że organizm człowieka składa się głównie z wody. Dokumentowi nadano numer 659411/26 i skierowano go do instytutów naukowych w Leningradzie do zaopiniowania. Opinia krytyków była jednak niepomysłna i zwierzchnicy odrzucili jego pomysł jako nie mający sensu. Skończyło się zatem na pomysle, ponieważ jako czerwonoarmista nie mógł swojej idei opublikować zagranicą, a komendant i inni zaczęli go nawet podejrzewać o szpiegostwo. Po wielu latach, kiedy pojawiły się prace Lauterburga i Mansfielda to Komitet d/s Wynalazczości odkopał zgłoszenie Iwanowa i je zaakceptował dopiero w latach 1970-tych. Ale już było za późno. Dziś fizyk Iwanow szkoli swoich studentów na zbudowanej przez siebie aparaturze MRI.

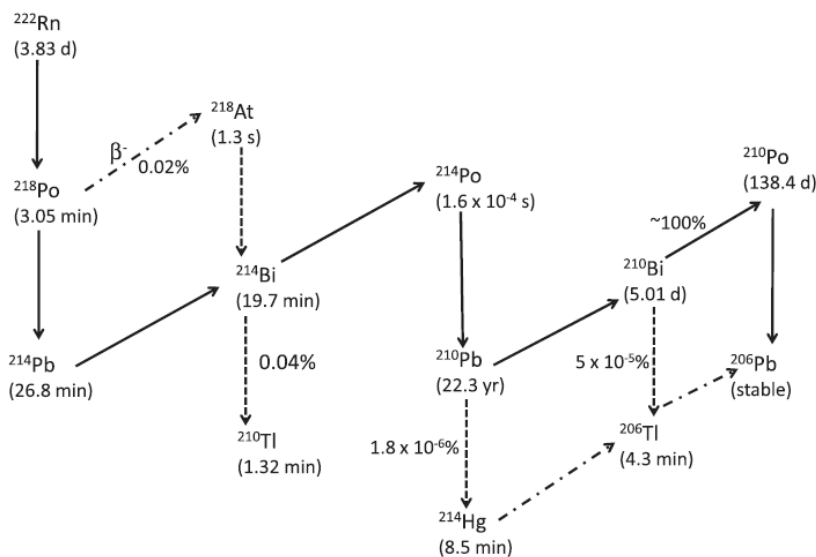
^{*)} <http://www.nature.com/nature/journal/v426/n6965/full/426375a.html>

**BARBARA PIOTROWSKA, KRZYSZTOF ISAJENKO, MARIAN FUJAK,
PAWEŁ LIPÍŃSKI**

ANALIZA SEZONOWYCH ZMIAN STĘŻENIA PROMIENIOTWÓRCZEGO PB-210 W PRZYZIEMNEJ WARSTWIE POWIETRZA ATMOSFERYCZNEGO

Wprowadzenie

Dawka skuteczna pochodząca od izotopów promieniotwórczych jaką otrzymuje przeciętny człowiek w ciągu roku w Polsce wynosi 3,31 mSv, z czego największy udział jest od radonu Rn-222 (1,20 mSv), który pochodzi z szeregu promieniotwórczego uranu U-238 [1]. Średnie stężenie Rn-222 w powietrzu atmosferycznym w Polsce wynosi ok. 8 Bq/m³ i zależy od geologii podłoża oraz warunków atmosferycznych [2]. Ołów Pb-210 o czasie połowicznego zaniku 22,3 lat jest jednym z długożyciowych produktów rozpadu Rn-222 (rys. 1), który będąc gazem dostaje się do atmosfery poprzez emanację ze skał, gleby oraz materiałów budowlanych [3].



Rys. 1. Schemat rozpadu promieniotwórczego Rn-222 [3]

Dane dotyczące zawartości promieniotwórczego izotopu Pb-210 w przyziemnej warstwie powietrza atmosferycznego pochodzą z monitoringu prowadzonego przez Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej, które do tego celu wykorzystuje system sieci wysokoczułych stacji wczesnego ostrzegania ASS-500. Pobór i pomiar aerozoli powietrza wykonywany jest w sposób ciągły w Warszawie od lat siedemdziesiątych, a od 1992 roku na 12 stacjach w całym kraju. Stacje monitorują nie tylko stężenia sztucznych radionuklidów pochodzących z awarii obiektów i instalacji jądrowych, ale także stężenia radionuklidów naturalnych, które występują w środowisku naturalnym.

Pb-210, który jest produkowany z rozpadu Rn-222 w atmosferze szybko się łączy z aerozolami powietrza. Czas połowicznego rozpadu Pb-210 jest znacznie dłuższy niż czas przebywania aerozoli w powietrzu, dzięki czemu jest wykorzystywany często jako znacznik do określenia czasu przebywania i usuwania aerozoli w atmosferze. Czas przebywania jest istotnym parametrem ponieważ określa on transport i może być użyteczny przy określeniu rozchodzenia się aerozoli w skali regionu oraz globalnej. Pionowy transport mas powietrza w troposferze spowodowany jest wzrostem

temperatury Ziemi w okresie wiosenno- letnim, natomiast poziomy transport powietrza wynika z różnicy ciśnień na danym terenie. Bazując na pomiarach stężenia Pb-210 raz jego produktów rozpadu m.in. Po-210 można określić czas przebywania promieniotwórczego Pb-210 w aerozolach przyziemnej warstwy powietrza, który wynosi od kilku do kilkunastu dni w zależności od warunków środowiskowych oraz pory roku, gdy aerozole te są osadzane na powierzchni poprzez suchą i moką depozycję [3, 4].

Aparatura pomiarowa

Stacja ASS-500 (Aerosol Sampling Station – przepływ nominalny 500 m³/h), przedstawiona na rys. 2, jest przeznaczona do monitoringu zanieczyszczeń powietrza w sytuacji normalnej i zagrożenia radiacyjnego.



Rys. 2. Nowy model stacji ASS-500 (stacja NASS-500 – New Aerosol Sampling Station).

Pobór aerozoli z objętości powietrza rzędu 10⁵ m³ (przy regulowanym i stabilizowanym przepływie w zakresie 100 - 900 m³/h) pozwala na wykonywanie precyzyjnych pomiarów spektrometrycznych radionuklidów naturalnych i sztucznych (rejestracja stężeń radionuklidów na poziomie 1 μBq/m³). Pobór próbek aerozoli może być prowadzony w zmiennych warunkach atmosferycznych, w dużym zakresie różnicy temperatur, przy zmieniającym się ciśnieniu czy wilgotności, a także przy mniejszym lub większym zapyleniu. Stacja ASS-500 jest wolnostojącym urządzeniem do ciągłego poboru próbek aerozoli z powietrza. Rutynowo do poboru aerozoli stosowany jest filtr Petrianova typu FPP-15-1.5 o wysokiej wydajności zbierania. Wydajność Filtru Petrianova typu FPP 15-1.5 jest w zakresie 96 % - 99 % dla aerozoli o średnicy 0,3 do 1,25 μm przy liniowym przepływie powietrza w zakresie 0,25 do 4 m/s i ciśnieniu wywieranego na filtr Δp 500 – 9300 Pa. W normalnej sytuacji radiologicznej prowadzony jest tygodniowy okres poboru próbki. Dodatkowo stacja ASS-500 jest wyposażona w sondę scyntylicyjną, która on-line rejestruje sytuację radiologiczną w miejscu lokalizacji stacji. Korzystając ze spektrometrów HPGe można wykrywać i oznaczać ilościowo radionuklidy naturalne i pochodzenia sztucznego. Zakres energii fotonów badanych radionuklidów zawiera się w granicach: od kilku do ponad 2000 keV. Przygotowanie próbki do pomiaru podstawowego polega na doprowadzeniu jej do odpowiedniej geometrii pomiarowej, czyli sprasowaniu jej do postaci krążka o średnicy 51 mm i grubości od 4 do 8 mm (zależnie od ilości zebranego pyłu) [5].

PROMIENIOWANIE JONIZUJĄCE

Pomiar promieniotwórczego ołowiu Pb-210 wykonywany jest laboratoryjnie poprzez pomiar linii gamma 46,4 keV przy pomocy detektora HPGe o wydajności względnej 45% umieszczonym w domku ołowianym.

Stacje zlokalizowane są w 12 miejscach na terenie Polski (rys. 3)

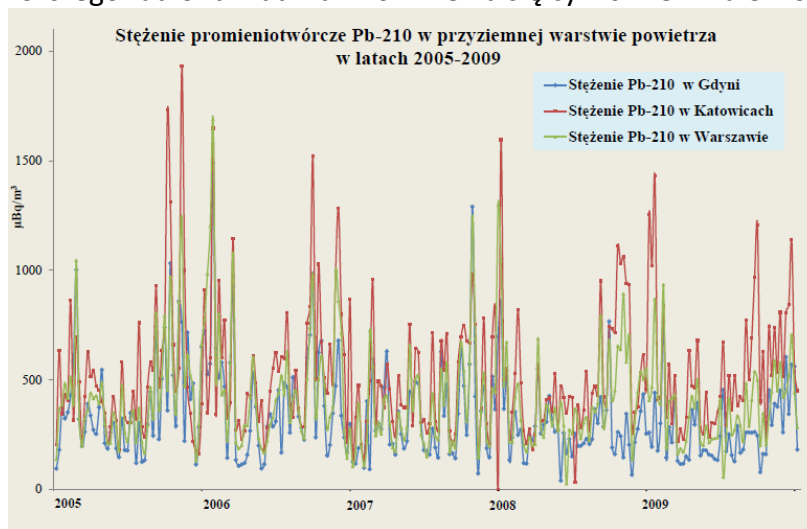


Rys. 3. Rozmieszczenie stacji ASS-500 na terenie Polski.

Wyniki pomiarów

Poniżej przedstawiono wyniki tygodniowych pomiarów stężenia Pb-210 w przyziemnej warstwie powietrza z trzech wybranych stacji ASS-500 w Polsce (Gdynia, Katowice i Warszawa) w okresach 2005-2009 oraz 2011-2012. Rejony zostały wybrane ze względu na różne położenie geograficzne stacji oraz masę aerozoli obecnych w powietrzu atmosferycznym.

Tygodniowe stężenie Pb-210 w powietrzu w latach 2005-2009 przedstawiono na rys 4. Wartość stężenia promieniotwórczego radionuklidu Pb-210 zmienia się cyklicznie w zależności od pory roku.

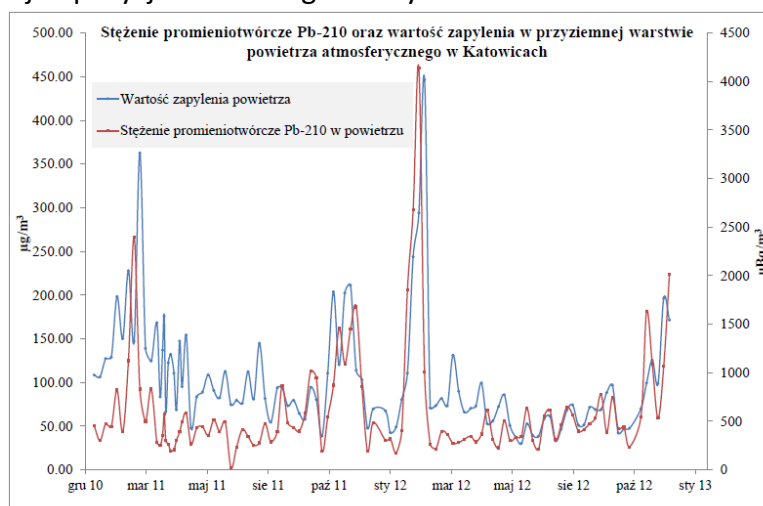


Rys. 4. Stężenie promieniotwórcze Pb-210 w przyziemnej warstwie powietrza w Gdyni, Katowicach oraz Warszawie w latach 2005-2009.

Największa sezonowa depozycja Pb-210 pojawia się w cyklicznie okresie jesienno-zimowym, spowodowane jest to m.in. spowolnieniem procesu mieszania się przyziemnych warstw powietrza w wyniku niższej temperatury, ograniczeniem transportu radonu Rn-222 w kierunku pionowym oraz

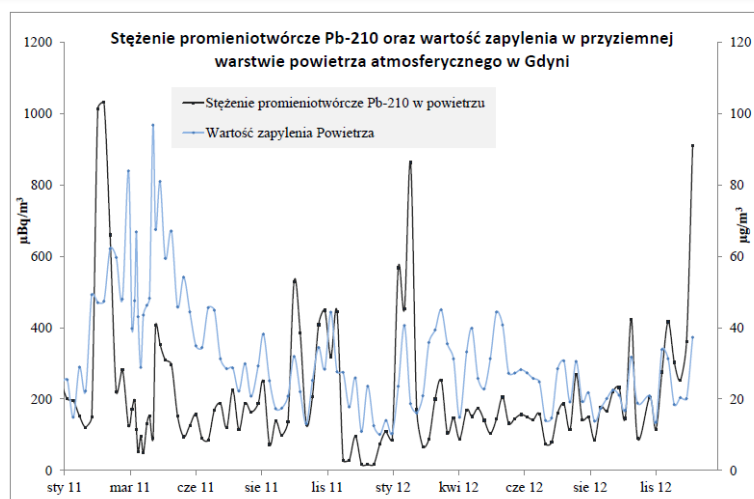
w wyniku mokrej depozycji. Najmniejsze natomiast wartości stężeń Pb-210 w powietrzu zaobserwowano w okresie wiosenno-letnim, kiedy w wyniku ogrzewania powierzchni Ziemi następuje ruch powietrza w kierunku pionowym, powodując rozrzedzenie produktów rozpadu Rn-222 w przyziemnej warstwie aerozoli powietrza. Wartości stężenia Pb-210 w Katowicach są wyraźnie większe niż w pozostałych dwóch stacjach, co może być spowodowane głównie geologią podłoża (wyższą zawartością Ra-226 w glebie) [6] oraz czynnikami środowiskowymi - Katowice znajdują się w rejonie uprzemysłowionym, gdzie promieniotwórczy Pb-210 może dostawać się dodatkowo do powietrza w wyniku spalania węgla, w okresie grzewczym. Wartości stężenia promieniotwórczego Pb-210 w Katowicach w okresie 2005-2009 przekroczyły kilkakrotnie $1,5 \text{ mBq/m}^3$, co jest znacznie poniżej wartości 27 mBq/m^3 , która dawałaby dawkę skuteczną $0,3 \text{ mSv}$, gdyby takie stężenie utrzymywało się w powietrzu w ciągu całego roku.

Na rysunku 5 przedstawiono stężenie promieniotwórcze Pb-210 oraz wartość zapylenia w przyziemnej warstwie powietrza w Katowicach w latach 2011-2012. Jak można zauważyć wartość zapylenia jest wyraźnie wyższa w sezonie zimowym i jest w korelacji z wartościami stężenia Pb-210 co może być spowodowana m.in. sezonem grzewczym oraz zmniejszonymi ruchami mas powietrza. W lutym 2012 roku stężenie Pb-210 w powietrzu przekroczyło 4 mBq/m^3 , także wartość zapylenia powietrza była w tym okresie wyraźnie wyższa w stosunku do pozostałych miesięcy, co mogło by świadczyć m.in o mokrej depozycji w okresie grzewczym.



Rys. 5. Stężenie promieniotwórcze Pb-210 oraz wartość zapylenia w przyziemnej warstwie powietrza w Katowicach w latach 2011-2012.

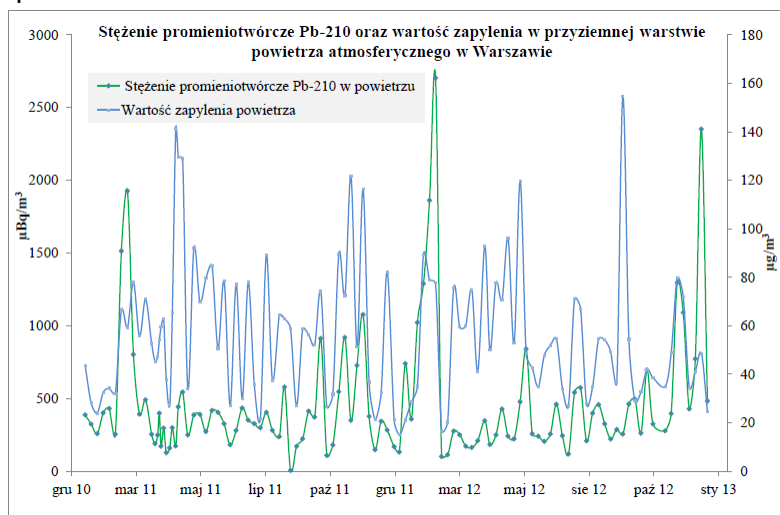
Na rys. 6 przedstawiono stężenie promieniotwórcze Pb-210 oraz wartość zapylenia w przyziemnej warstwie powietrza w Gdyni w latach 2011-2012.



Rys. 6. Stężenie promieniotwórcze Pb-210 oraz wartość zapylenia w przyziemnej warstwie powietrza w Gdyni w latach 2011-2012.

Wartość zapylenia powietrza w Gdyni jest kilka razy niższa niż w Katowicach. Zaobserwować można sezonowy wzrost wartości zapylenia w okresie wiosennym. Stężenie promieniotwórczego Pb-210 jest także wyraźnie wyższe w sezonie jesienno- zimowym mając swoje maksima w lutym (wartości powyżej $800 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$).

Na rys. 7 przedstawiono stężenie promieniotwórcze Pb-210 oraz wartość zapylenia w przyziemnej warstwie powietrza w Warszawie w okresie 2011-2012.



Rys. 7. Stężenie promieniotwórcze Pb-210 oraz wartość zapylenia w przyziemnej warstwie powietrza w Warszawie w okresie 2011-2012.

Zapylenie powietrza w Warszawie jest wyższe niż w Gdyni, jednak niższe niż w Katowicach oraz podobnie jak w Gdyni jest wyraźnie wyższe w sezonie wiosennym. Podobnie jak w innych stacjach stężenie promieniotwórcze Pb-210 jest wyższe w okresie zimowym przekraczając w lutym $1500 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$.

Wnioski

Zmiany stężenia promieniotwórczego Pb-210 w przyziemnej warstwie aerozoli powietrza spowodowane są m.in. suchą i mokrą depozycją. Depozycja ta ulega zmianie cyklicznie w zależności od pory roku, a wielkość depozycji jest związana z wielkością emanacji radonu Rn-222 z gleby oraz ruchem warstw powietrza w okresie wiosenno-letnim.

Na zmiany stężenia promieniotwórczego Pb-210 ma także wpływ ilość zawartych w powietrzu aerozoli, o czym świadczą pomiary wykonane w Katowicach oraz w Gdyni.

Literatura:

1. J. Henschke, P. Lipiński, 2013, „Ocena narażenia radiacyjnego ludności Polski w 2012 roku, Raport CLOR
2. A. Palczewska, „Radon w środowisku człowieka: pochodzenie i stężenie, metody pomiarowe, zagrożenie, strona internetowa: <http://www.if.pw.edu.pl/~pluta/pl/dyd/mtj/zal1/pz07/Radon2.pdf>
3. M. Baskaran, 2011, Po-210 and Pb-210 as atmospheric tracers and global atmospheric Pb-210, *Journal of Environmental Radioactivity* 102 (2011) 500e513
4. C. Papastefanou, 2009, „Radon Decay Product Aerosols in Ambient Air, *Aerosol and Air Quality Research*, 9: 385-393, 2009
5. M. Fujak, P. Lipiński, K. Isajenko, B. Piotrowska, „Analiza 23-go cyklu aktywności Słońca w oparciu o pomiary Be-7 w przyziemnej warstwie powietrza atmosferycznego *Postępy techniki Jądrowej* 2/2013
6. K. Isajenko, B. Piotrowska, M. Fujak, M. Kardas, 2012, „Atlas radiologiczny Polski 2011”, Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, Warszawa.

Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej, Zakład Dozymetrii
ul. Konwaliowa 7; 03-194 Warszawa



Mała encyklopedia energii jądrowej

Mini Encyclopedia of Nuclear Energy

Mała encyklopedia
energii jądrowej

Mini Encyclopedia
of Nuclear Energy

Warszawa
Grudzień 2012

