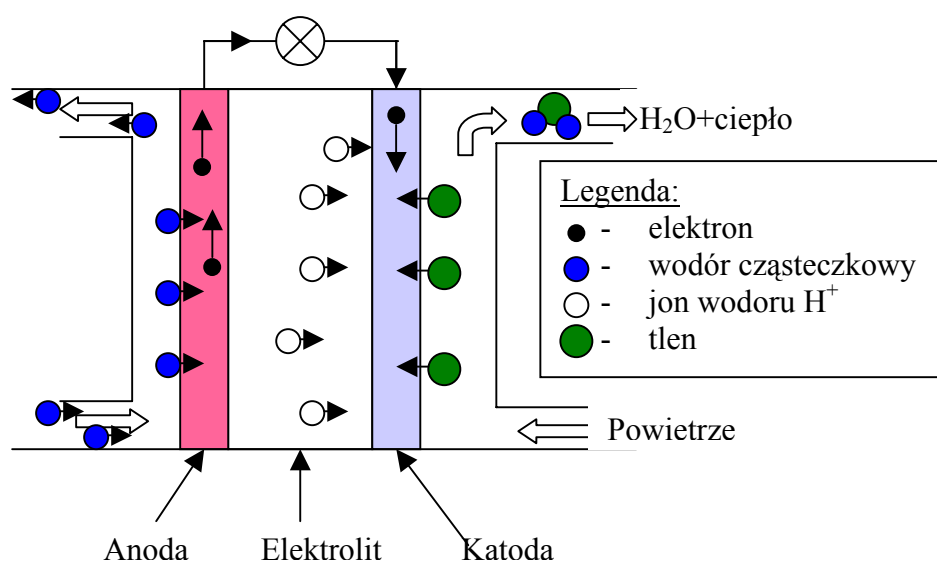


XVIII. ENERGIA JĄDROWA W PRZEMYSŁE, MEDYCYNIE, ARCHEOLOGII I SZTUCE

18.1 Energia jądrowa dla produkcji wodoru

Wodór odgrywa rosnącą rolę w chemii, rolnictwie (produkcji nawozów azotowych), czy w przemyśle naftowym i stanowi potencjalne źródło energii, tj. paliwo. Można oczekiwać, że spośród rozlicznych zastosowań wodoru, najpopularniejszym będzie wykorzystanie go w ogniwach paliwowych (rys. 18.1). Oczywiście zaletą korzystania z wodoru jako źródła energii jest fakt, że wodór nie zanieczyszcza środowiska, jak dwutlenek węgla, produkowany obecnie w dużych ilościach m.in. przy produkcji wodoru z paliw kopalnych.



Rys. 18.1 Zasada ogniw paliwowych.

Jako elektrolit służy membrana polimerowa. Gazowy wodór wprowadzany jest z zewnątrz z lewej strony, tlen zawarty w powietrzu zaś z prawej. W drodze reakcji katalitycznej na powierzchni anody (zazwyczaj platynowej) wodór rozdzielany jest na dodatnie jony wodoru (protony) i elektrony. Elektrolit jest tak dobrany, aby przepuszczał tylko protony. Na wyjściu z elektrolitu protony łączą się z tlenem i płynącymi przez odbiornik elektronami tworząc wodę. Powstałe ciepło jest wynikiem wytwarzania przez ogniwo energii elektrycznej z wydajnością mniejszą niż 100%.

W świetle wzrastającego zainteresowania wodorem ocenia się, że energia potrzebna do jego wytwarzania będzie porównywalna z obecną produkcją energii elektrycznej. Jesteśmy zatem zainteresowani wydajnymi źródłami energii, które mogłyby być użyte do produkcji wodoru i tu wykorzystanie energii jądrowej może być niezwykle pomocne. Jądrowa energia cieplna mogłaby być też wykorzystana do otrzymywania wodoru z naturalnego gazu oraz z wody w procesach termochemicznych. W odróżnieniu od procesów chemicznych, w których para reaguje z gazem ziemnym, reakcje termochemiczne mają tę zaletę, że nie produkują dwutlenku węgla. Ponieważ w obu wypadkach potrzebna jest wysoka temperatura (1000 - 1300 K), jest rzeczą prawdopodobną, że wykorzystana zostanie energia reaktorów wysokotemperaturowych. Reaktory te, obsługujące typowe elektrownie jądrowe i dostarczające energię elektryczną do

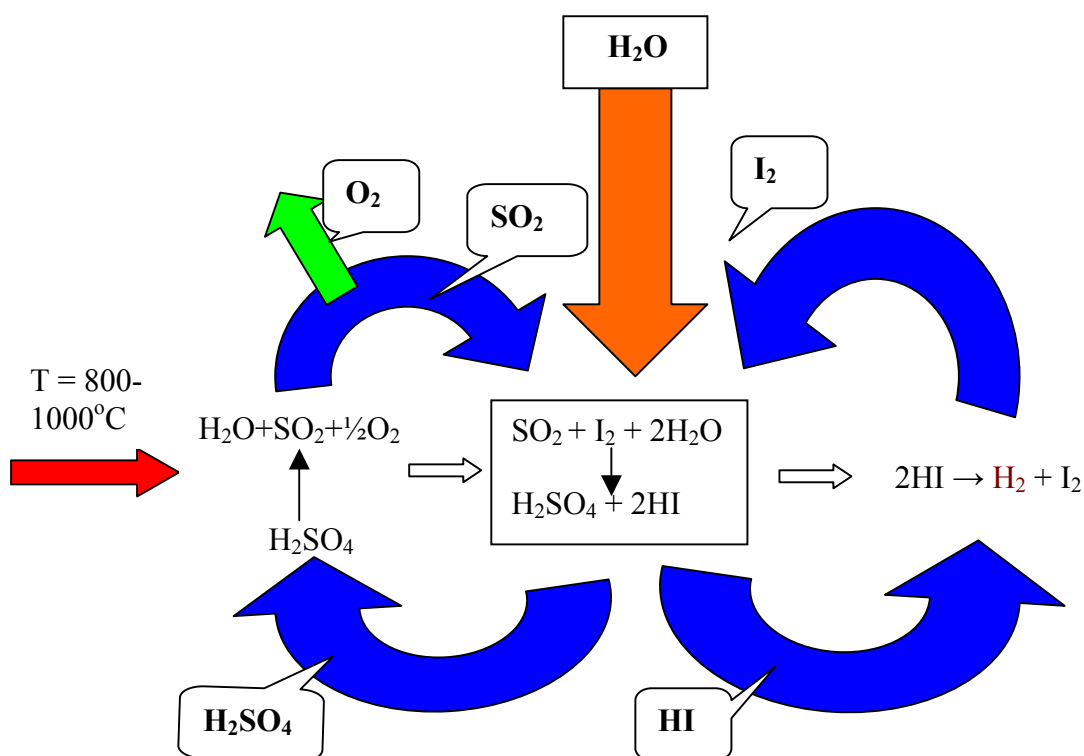
sieci podczas dnia, wytwarzałyby wodór w nocy i przygotowywałyby dostawę wodoru na dzień następny. Taki sam tryb pracy można byłoby przyjąć też dla bardziej konwencjonalnych reaktorów jądrowych, tyle że znacznie niższe temperatury osiągane na wyjściu reaktora pozwalają jedynie wykorzystać energię elektryczną do wytworzenia wodoru metodami elektrochemicznymi. Na pewno taka technika będzie wykorzystywana w pierwszej chwili. Technika wykorzystania reaktorów wysokotemperaturowych dla technologii termochemicznego wytwarzania wodoru, to jednak jest ta przyszłość reaktorów IV generacji, o której się dziś myśli.

Dziś niemal cały produkowany wodór pochodzi z przetworzenia ropy, co prowadzi do emisji dwutlenku węgla: każda wyprodukowana tona wodoru, to uboczna produkcja 11 ton CO₂, a więc efekt silnie niepożądany. Z drugiej strony wzrastające ceny ropy naftowej kazały myśleć o znacznym zwiększeniu roli wodoru w bilansie energetycznym, szczególnie w transporcie. Ograniczenie emisji CO₂ i wzrost cen gazu mogą spowodować dalszy wzrost nacisku na produkcję wodoru, jako paliwa przyszłości.

Ważny problem, który się pojawia w kontekście wytwarzania wodoru przy użyciu reaktorów jądrowych, jest związany z przesyłaniem wodoru na dalsze odległości. Problem ten jest oczywisty, gdyż nie można spodziewać się zbudowania gęstej sieci reaktorów w jakimkolwiek kraju. Oznacza to, że nie tylko produkcja, ale także problem efektywnego gromadzenia wodoru muszą być rozwiązywane równolegle. Jak się przewiduje, scenariusz wykorzystania energii jądrowej dla produkcji wodoru będzie następujący:

- w pierwszym etapie wykorzystana się pracę elektrowni jądrowych poza szczytowymi obciążeniami sieci elektrycznej i metoda produkcji będzie klasyczna: stosunkowo droga metoda elektrolizy (wyprodukowanie 1 kg wodoru wymaga energii 46 kWh);
- w dalszym wykorzystana się ciepło z reaktorów dla przerobu (reformingu) gazu ziemnego. Ta technika jest tańsza od klasycznego reformingu. Wymaga ona temperatur do 900°C, jest dobrze znana, ale produkuje dużo dwutlenku węgla. Przebiega ona w wypadku metanu wg następującej reakcji:
$$\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} + 185 \text{ kJ} \rightarrow \text{CO}_2 + 4\text{H}_2$$
- następnie powinno wykorzystana się wysokotemperaturową technologię elektrolizy pary, która to technika jest możliwa przy temperaturach powyżej 800°C, i dla przeprowadzenia której należy wykorzystać zarówno ciepło, jak i energię elektryczną uzyskiwane z reaktorów jądrowych. Metoda ta to naturalny krok do cyklu termochemicznego;
- reaktory wysokotemperaturowe IV generacji powinny pozwolić na wytwarzanie wodoru z wody drogą termochemiczną.

W miarę udoskonalanych technologii wydajność procesu produkcji powinna wzrastać od około 25% przy obecnych reaktorach i metodzie elektrolizy, do 36% przy wydajniejszych reaktorach, do 45% przy wysokotemperaturowej elektrolizie pary i wreszcie 50% w procesie termochemicznym. Najpopularniejszy pomysł na tę ostatnią technologię jest następujący. W wysokich temperaturach (800 – 1000°C) następuje rozkład kwasu siarkowego na wodę i dwutlenek siarki. Z kolei w procesie siarkowo-jodowym dwutlenek siarki reaguje z jodem i wodą tworząc jodek wodoru. Reakcja ta wymaga stosunkowo niewielkiej temperatury 120°C. Ten ostatni dysocjuje w temperaturze około 350°C do jodu i wodoru. W istocie całość procesu wygląda, jak na rys. 18.2.



Rys. 18.2 Cykl jodowo-siarkowy otrzymywania wodoru drogą reakcji termochemicznej

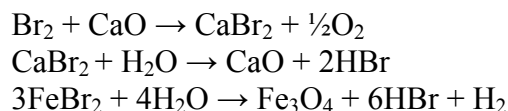
Biorąc pod uwagę przebieg opisanego tu cyklu, mamy do czynienia z reakcją wypadkową:



Utworzony wolny tlen jest tu wprawdzie produktem ubocznym, lecz także podlega sprzedaży. Jak dotąd, proces jodowo-siarkowy przeprowadzono na skalę laboratoryjną w Japonii z wydajnością 30 litrów wodoru na godzinę. Nad rozwinięciem technologii tego procesu prowadzone są także intensywne prace w USA i Francji, a cena uzyskiwanego w ten sposób wodoru może wynosić 1,5 – 2 USD za kilogram. Do prac nad rozwojem reaktorów do produkcji wodoru włączają się intensywnie Korea Południowa, a także Chiny.

Opisując proces jodowo-siarkowy warto zwrócić uwagę na rolę wysokiej temperatury: wydajność tego procesu w 1000°C jest trzykrotnie wyższa niż w 750°C. Naturalną trudnością, obok uzyskania tak wysokiej temperatury z reaktora, jest konieczność odizolowania przetwórci chemicznej od pobliskiego reaktora, czego wymagają względy bezpieczeństwa.

Proces jodowo-siarkowy nie jest bynajmniej jedynym możliwym. W Japonii (Uniwersytet w Tokyo) zaproponowano wykorzystanie tzw. procesu UT-3, który polega na wykorzystaniu sekwencji reakcji:





Jak widać i w tym procesie produktami końcowymi są wodór i woda. Pierwsze trzy reakcje przebiegają w temperaturach odpowiednio 600°C, 750°C i 600°C, ostatnia zaś w temperaturze 300°C.

Biorąc to pod uwagę, rozpatruje się trzy rodzaje reaktorów, które mogą być przydatne:

1. HTGR lub VHTR (od ang. *Very High Temperature Reactor*) z usypanym złożem i chłodzony gazowym helem pod wysokim ciśnieniem. Tego typu reaktory mogą być wytwarzane jako moduły o niskiej mocy, np. 285 MWe, i dawać na wyjściu gaz o temperaturze 950°C, a w wypadku reaktorów VHTR nawet 1250°C;
2. AHTR (od ang. *Advanced High Temperature Reactor*), reaktor modułowy, wykorzystujący paliwo kulowe i chłodzony solami fluorkowymi, którymi nauczono się bezpiecznie operować przy okazji rozwoju przemysłu aluminium. Reaktor ten nie różni się specjalnie od HTGR lecz pracuje przy niskim ciśnieniu i wyższej temperaturze. Tu rozpatruje się reaktory o mocach 1000 MWe/2000 MWt;
3. Reaktory prędkie chłodzone ołowiem, pomimo ich niższych temperatur pracy. Np. rosyjski reaktor BREST pracuje przy temperaturze 540°C, a planowany w USA reaktor STAR-H2, przeznaczony do produkcji wodoru będzie dawał temperaturę 780°C i nieco niższą dla do odsalania wody morskiej (patrz następny paragraf).

Rozpatrywana jest również opcja reaktora jądrowego w postaci swoistej baterii o mocy 100 MWe, która jest instalacją kompaktową o długim okresie pracy, dostarczaną do odbiorcy w całości i gotową do natychmiastowego użycia.

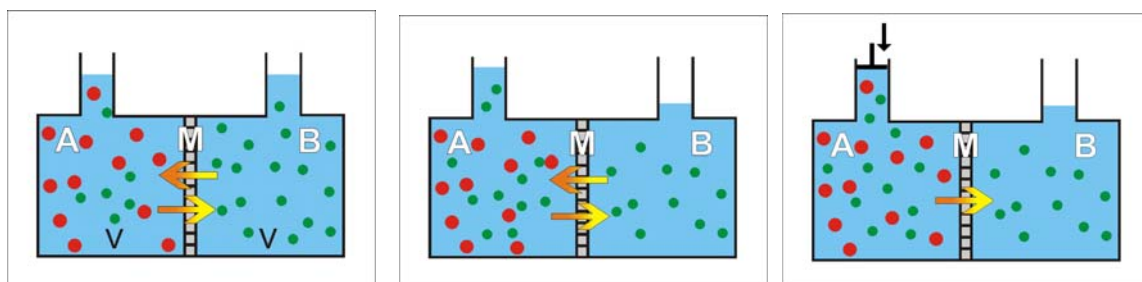
Jak się ocenia moduł reaktorowy HTGR pracujący na mocy 600 MWt może być wykorzystany do produkcji około 200 ton wodoru dziennie – tyle, ile wynosi obecne zapotrzebowanie przez przemysł. Według ocen japońskich, pierwsza produkcja wodoru metodą termochemiczną powinna przejść niezbędne testy w Japonii około 2010 roku, a w 2015 roku wodór powinien już być produkowany rutynowo. Na uwagę zasługuje też fakt, że wodór produkowany przy użyciu technologii jądrowych jest gazem o dużej czystości, co z kolei jest warunkiem niezbędnym dla produkcji ogniwi paliwowych.

Opisana wyżej technologia uzyskiwania wodoru nie wszystkim się podoba i w szczególności protestują organizacje ekologiczne, jak zawsze przeciwne wszystkiemu co jądrowe. Ich argumenty, to koszty produkcji, lokalność struktury produkcyjnej i nieuchronny problem odpadów promieniotwórczych. Jak zauważają¹, obecny koszt produkcji wodoru jest znacznie niższy niż koszt jego transportu i dystrybucji. W wypadku produkowania wodoru w rzadkiej sieci reaktorów, te koszty będą więc znaczące. Argumenty tego typu są jednak słabo uzasadnione analizami ekonomicznymi i znajomością procesów jądrowych, a nadzieja na bardziej konwencjonalne sposoby wytwarzania wodoru bez jednoczesnej wielkiej emisji substancji szkodliwych dla środowiska także nie jest poparta mocnymi dowodami. Tak więc propozycja przemysłu jądrowego powinna być rozważana serio i wszystko wskazuje na to, że wejdzie stosunkowo niedługo w życie.

¹ www.nirs.org

18.2 Energia jądrowa dla odsalania wody

Energia jądrowa jest już wykorzystywana do odsalania wody, przyczyniając się do rozwiązania problemu niezwykle istotnego dla znacznych obszarów Świata cierpiących na brak wody pitnej. Spośród ogólnych zasobów wodnych, woda pitna stanowi² zaledwie 2,5%, a i z tego niewielkiego ułamka jej 2/3 jest zamrożona w lodowcach. Z pozostałej części około 20% znajduje się w słabo dostępnych rejonach, a około 3/4 pochodzi z monsunów i powodzi, które pojawiają się przypadkowo i przynoszą wodę silnie zanieczyszczoną, więc nie nadająca się do picia. Ostatecznie pozostaje do bezpośredniego użytku zaledwie 0,08% całkowitej ilości wody na kuli ziemskiej. Brak wody jest szczególnie dotkliwy w Azji i Afryce Północnej, ale także na dużych obszarach Kazachstanu i innych dawnych republik radzieckich. Obecnie 1,1 miliarda ludzi jest pozbawionych wody bezpiecznie nadającej się do spożycia, a to powoduje 3,3 miliarda zachorowań i 2 miliony zgonów rocznie. Wraz ze wzrostem zaludnienia naszej planety można przewidywać, że ta już obecnie zła sytuacja będzie się pogarszać i może nawet wywoływać lokalne wojny o wodę, gdyż można oczekiwać, że w okolicach roku 2025 niemal 2/3 ludności Świata będzie pozbawionych wody. Wynika stąd, że należy bardzo poważnie skupić się na uruchomieniu wszystkich dostępnych technologii, które mogą zapobiec takiej katastrofie.



Rys. 18.3 Prosta i odwrócona osmoza.

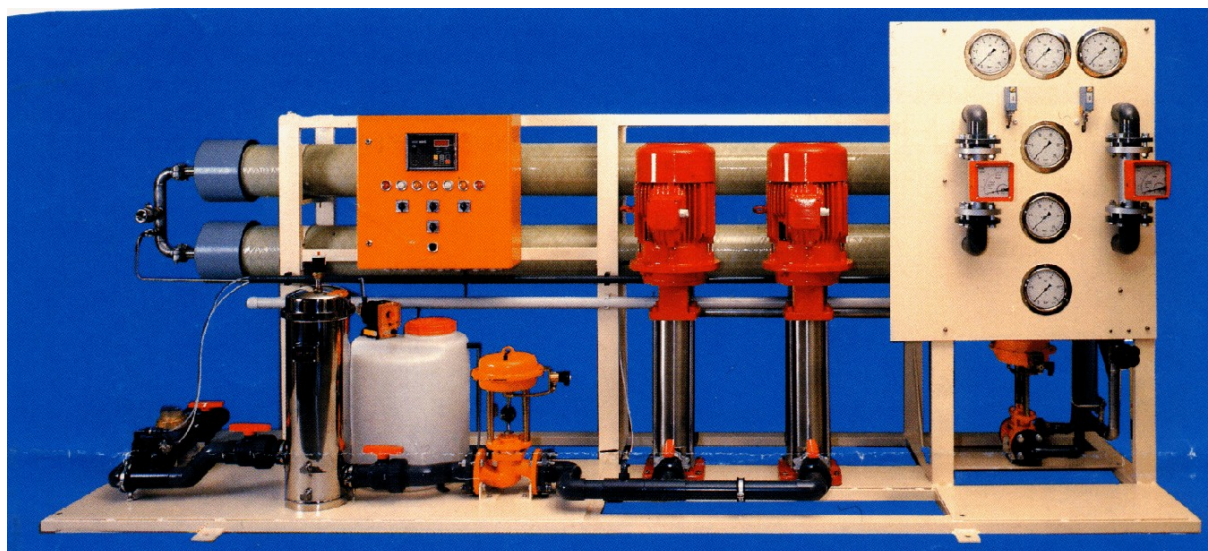
Jeśli poziom roztworu (rozpuszczalnik plus „duże” cząsteczki) w części A naczynia, oddzielonej od części B membraną M, jest taki sam (rysunek z lewej), jak poziom rozpuszczalnika w części B, cząsteczki rozpuszczalnika (zielone) będą przenikać do części A aż do wyrównania ciśnień rozpuszczalnika po obu stronach membrany (dyfuzja przez membranę może dotyczyć tylko cząsteczek o rozmiarach mniejszych od rozmiarów porów w membranie). Nadwyżkę ciśnienia w części A, pochodzącą od „dużych” cząsteczek nazywamy **ciśnieniem osmotycznym** (rys. środkowy). Jeśli z kolei na roztwór w części A wywrzemy ciśnienie przewyższające osmotyczne, cząsteczki rozpuszczalnika zaczną przenikać do części B, a roztwór w części A będzie się zateżać (rys. z prawej). Proces ten nosi nazwę **odwróconej osmozy**.

Podobnie jak w wypadku produkcji wodoru, dzisiejsze metody odsalania wody morskiej (głównie wielostopniowa destylacja i zyskująca na znaczeniu odwrócona osmoza, patrz rys. 18.3) wykorzystują paliwa kopalne, a to z kolei przyczynia się do wzrostu ilości produkowanych gazów cieplarnianych. Aby zdać sobie sprawę z zapotrzebowania, dzisiejsza dzienna produkcja wody pitnej³, to 30 milionów m³, z czego połowa produkowana jest na

² R.S.Faibish, T.Konishi, *Nuclear Desalination: a viable option for producing freshwater*, *Desalination* 157 (2003) 241-252

³ Wg <http://www.uic.com.au/nip74.htm>

Bliskim Wschodzie. Największa wytwórnia takiej wody produkuje dziennie 454 tysiące m³, a liczba wytwórni wody na Świecie sięga 12500. Produkcja ta pochłania wielkie ilości energii elektrycznej. Dla wyprodukowania 1 m³ wody pitnej metodą odwróconej osmozy (metoda ta jest popularna w Izraelu i na Malcie, a ostatnio w Singapurze) potrzeba zużyć około 6 kWh. Cena 1 m³ wyprodukowanej w ten sposób wody, to około 50 centów. Przykład jednostopniowego modułu membranowego do odwróconej osmozy pokazuje rys. 18.4. Metody destylacyjne wymagają prowadzenia procesu w temperaturach 70 – 130 stopni i dostarczenia energii elektrycznej 25 – 200 kWh/m³. Produkuje się dzięki nim czystsza wodę niż w metodzie odwróconej osmozy.



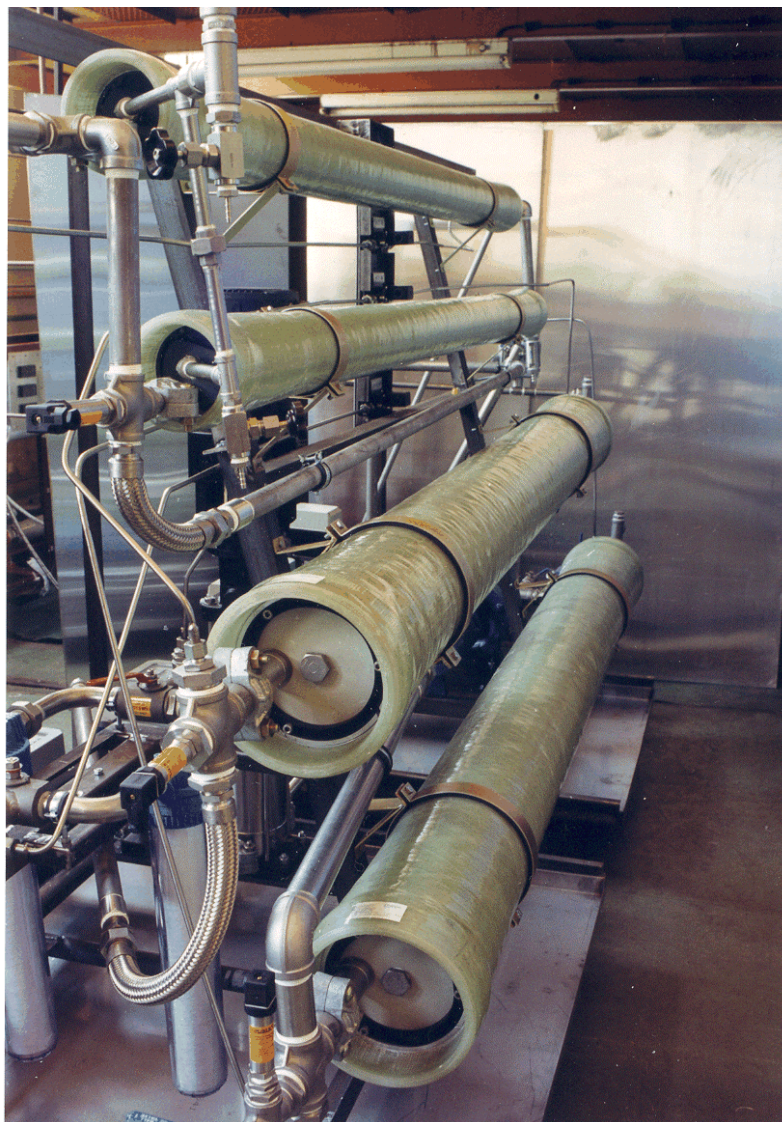
Rys. 18.4 Jednostopniowa jednostka membranowa do odsalania wody (prod. Toray, Japonia)

Metoda odwróconej osmozy może być także efektywnie wykorzystywana w procesie zateżnienia odpadów promieniotwórczych. Na rys. 18.5 pokazany jest trzystopniowa kaskada modułów, stosowana w Zakładzie Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych w Świerku. Ze względu na mechaniczną wytrzymałość membran takie zestawy stosuje się do zateżnienia jedynie odpadów β - i γ -promieniotwórczych, natomiast samo funkcjonowanie membran jest identyczne, jak w wypadku odseparowywania solanki od czystej wody.

W roku 1963 Philip Hammond z Oak Ridge National Laboratory zauważył, że reaktory jądrowe mogą dostarczyć energii niezbędnej do procesu odsalania wody morskiej, a przy tym wytwarzać energię elektryczną, tj. działać jako małe elektrownie jądrowe. Istotnie, Świat ma już za sobą doświadczenia ponad 150 reaktoro-lat takich zintegrowanych układów, w których reaktor jądrowy dostarcza energii niezbędnej dla procesu odsalania. Doświadczenia te były głównie udziałem Kazachstanu, Indii i Japonii. *Nota bene*, warto wiedzieć, że 1 m³ wody morskiej zawiera ilość uranu wystarczającą do wyprodukowania 1 m³ świeżej wody z energii jego rozszczepienia.

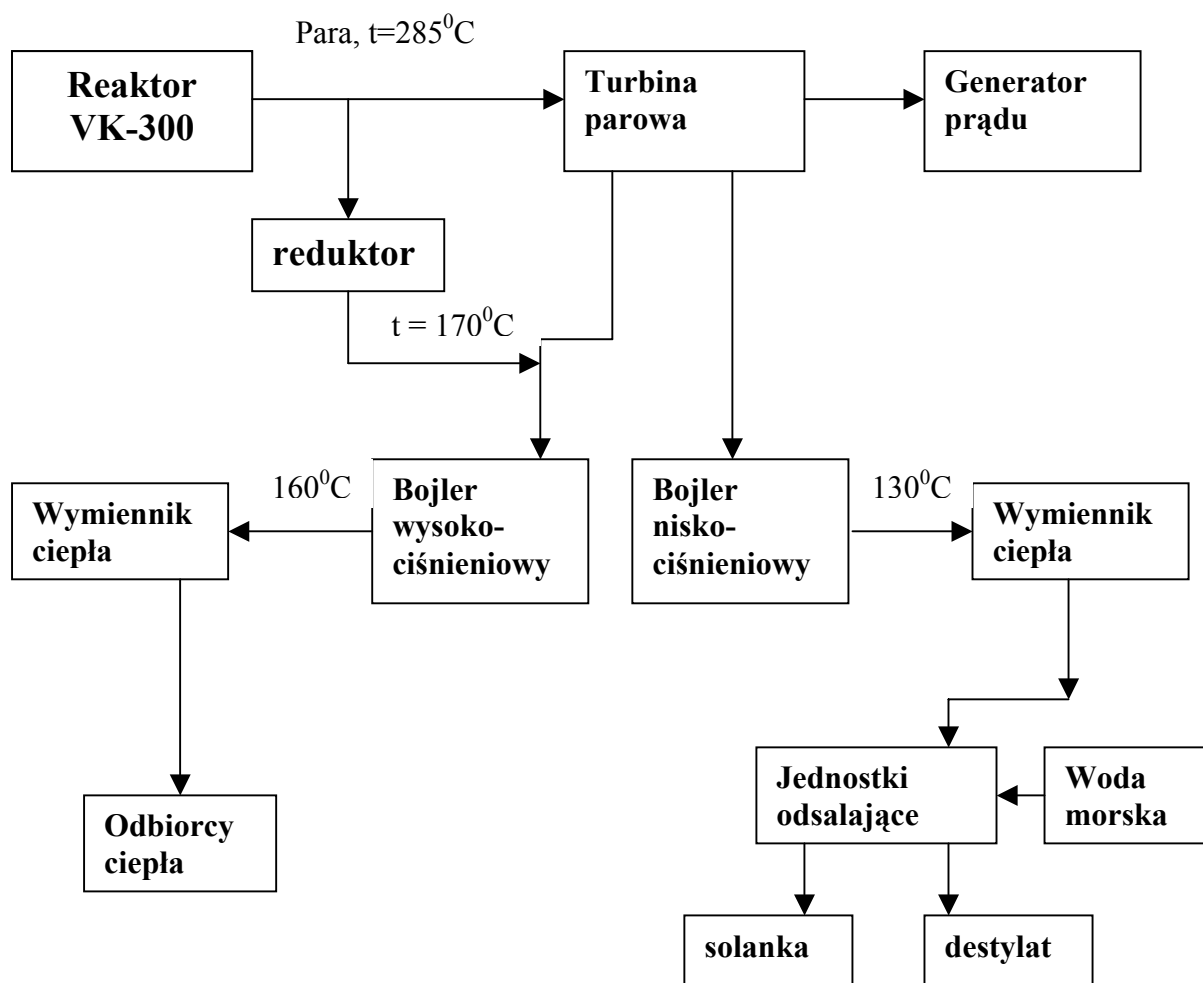
Dla celów odsalania wystarczą reaktory małe i średnie. Ocenia się, że mogłyby one dawać dzienną produkcję wody odpowiednio 80000–100000 m³ i 200000–500000 m³. Przykładem reaktora jądrowego wytwarzającego zarówno energię elektryczną, jak i energię potrzebną do odsalania wody, jest chłodzony sodem reaktor BN-350 na neutronach prędkich w Aktau, Kazachstan, działający od 1999 roku i będący zdolny do produkcji mocy elektrycznej do 135

MWe i wody pitnej 80000 m³/dzień. W Japonii działa 10 instalacji przyłączonych do reaktorów PWR, produkując dziennie 1000 – 3000 m³ wody. Wytwarzana woda służy także chłodzeniu reaktorów. Takie państwa, jak Indie, Rosja i Kanada mają już spore doświadczenia w zastosowaniu reaktorów do odsalania wody, a jednocześnie do celów grzewczych. Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej także silnie promuje tego typu zastosowania energii jądrowej. Podobnie jak w wypadku produkcji wodoru główny pomysł polega na wykorzystaniu elektrowni jądrowych do zasilania sieci energetycznych w okresie najwyższego zapotrzebowania, a gdy się ono zmniejsza, wykorzystania energii elektrycznej do innych celów, jak napędzania pomp do odsalania metodą odwróconej osmozy. Projekty tego typu są rozwijane obecnie w Hiszpanii, Anglii, Indiach, Chinach, Pakistanie, Rosji, Tunezji, Maroku, Egipcie, Algierii, Korei Południowej, Indonezji i Argentynie. Istotnym elementem wszystkich projektów jest zapewnienie jak najniższych kosztów produkcji, konkurencyjnych w stosunku do konwencjonalnych technik. Służy temu program DEEP (od ang. *Desalination Economic Evaluation Program*) prowadzony przez Międzynarodową Agencję Energii Atomowej.



Rys. 18.5 Zestaw modułowy trzech jednostek membranowych używanych w Zakładzie Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych w Świerku

Zagadnienie od strony technicznej wcale nie jest bardzo proste, gdyż niezależnie od normalnych warunków, które musi spełniać teren, aby można w nim umieścić reaktor jądrowy, tu musimy się starać umieścić reaktor w pobliżu centrum odbioru wytworzonej wody, musimy uwzględnić specyfikę odsalanej wody morskiej lub oceanicznej, a także możliwy wpływ odprowadzanej solanki na środowisko. Poza dyskusją staje się sprawa zabezpieczenia produkowanej wody pitnej przed uwolnieniami radioaktywnymi. Warto natomiast zdać sobie sprawę, że czas życia reaktorów jądrowych jest z reguły dłuższy niż czas życia urządzeń do odsalania. Tak więc należy tak przygotować całość instalacji, aby można było po czasie zużycia urządzeń do odsalania (ok. 25 lat) prowadzić ich wymianę bez przeszkadzania reaktorom w ich produkcji energii elektrycznej, ciepła i wody.



Rys. 18.6 Uproszczony schemat instalacji do odsalania wody morskiej, generacji elektryczności i ciepła, opartej na reaktorze VK-300RF

W roku 2004 Rosjanie przedstawili⁴ projekt ciekawej instalacji opartej na reaktorze wrzącym VK-300. Tu odsalanie wody odbywa się głównie drogą wielostopniowej destylacji, a planowana wydajność instalacji, w skład której wchodzi dwa reaktory, to 300 000 l wody/dzień. Koszt produkcji wody został oceniony na 0,58 USD/l. Instalacja będzie dodatkowo dostarczała do sieci energetycznej 357 MWe, koszt zaś tej energii wyniesie 0,029

⁴ B.A.Gabarayev, Yu.N.Kuznetsov, A.A.Romenkov, Yu.A.Mishanina, *Nuclear Desalination Complex with VK-300 Boiling-Type Reactor Facility*, World Nuclear Association Annual Symposium (2004) 1-16

USD/kWh. Na rys. 18.6 pokazujemy zaproponowany przez Rosjan uproszczony schemat instalacji, która może dostarczać także ciepła. Rosja też rozpatruje wykorzystanie reaktorów KLT-40 używanych w napędach statków.

W tym kontekście warto także zwrócić uwagę na ocenę⁵, że reaktor wysokotemperaturowy z usypanym złożem, pracujący na mocy 20 MWt i mający rozmiary 10x10x10 metrów, może pracować w cyklu trzyletnim (bez wymiany paliwa) i zaspokoić pełne zapotrzebowanie na energię (elektryczną, ciepłą, a także potrzebną na wyprodukowanie odpowiedniej ilości wody) dla ok. 27500 osób. Zgodnie z obecnymi trendami, taki reaktor nie wymagałby obsługi. Jego modułowość pozwala na wyprodukowanie go i przetestowanie u producenta, a następnie przetransportowanie go drogą lądową, wodną lub powietrzną na miejsce pracy. Raz uruchomiony reaktor z turbiną gazową jest sterowany i monitorowany zdalnie. Modułowa konstrukcja sprzyja także łatwości wymiany paliwa, niewielkie rozmiary pozwalają umieścić go częściowo pod ziemią, a całość jest względnie tania zarówno na etapie inwestycji, jak i utrzymania. Podobnie długi cykl paliwowy ma mieć instalacja w Korei Południowej, gdzie myśli się o reaktorze SMART (od ang. *System-integrated Modular Advanced Reactor*) o mocy 330 MWt, skojarzonym z zespołami do wielostopniowej destylacji.

18.3 Energia jądrowa w codziennym użyciu⁶



Rys. 18.7 Typowy wygląd czujki dymu

Czujka dymu, rys. 18.7, jest bodaj najprędzej rozpoznawalnym przedmiotem codziennego użytku, spotykanym w różnych salach i miejscach szczególnie chronionych przed pożarem. Jej „sercem” jest alfa-promieniotwórcze źródło ^{241}Am . Izotop ^{241}Am jest produktem rozpadu beta izotopu ^{241}Pu wytwarzanego w reaktorze jądrowym. Choć istnieją wykrywacze dymu oparte na czujniku fotoelektrycznym, którego zmniejszające się natężenie świecenia sygnalizuje obecność dymu, czujki wykorzystujące promieniowanie alfa są jakościowo lepsze, a także niedrogie.

⁵ G.A.K.Crommelin, I.W.F.Crommelin, *Nuclear Desalination. The Small and Peaceful Way*, Paper GT2004-53337, Proc. Of ASME Turbo Expo (2004) 1-7

⁶ Paragraf ten wykorzystuje w większości treść rozdziału 3 broszury L.Dobrzyński, E.Droste, W.Trojanowski, R.Wońkiewicz, *Spotkanie z promieniotwórczością*, IPJ-Świerk (2005)

Sam ameryk-241 jest izotopem długożyciowym, jego okres połowicznego zaniku, to 432 lat. Wysyłane przez niego promieniowanie alfa jest silnie pochłaniane w powietrzu i stąd też znajdująca się pod sufitem czujka nie stanowi dla ludzi żadnego zagrożenia radiacyjnego (zasięg tych cząstek w powietrzu wynosi ok. 4 cm). Dzieje się tak nawet pomimo emisji także niskoenergetycznego promieniowania gamma (energia 60 keV), z reguły silnie pochłanianego przez warstwę powietrza nad nami. Aktywność użytego izotopu jest ponadto niewielka, mniejsza od 35 kBq. Sam ameryk sprzedawany jest w formie AmO₂ w cenie ok. 1500 USD/g, a z jednego grama można wytworzyć aż 5000 czujek!

Konstrukcja izotopowej czujki dymu jest bardzo prosta, gdyż jest to de facto komora jonizacyjna. Promieniowanie alfa wytwarza w powietrzu jony, które z kolei są zbierane przez elektrody o niewielkiej różnicy potencjału między nimi. Gdy do środka czujki dostaje się dym, promieniowanie alfa jest zatrzymywane przez cząsteczki dymu, co radykalnie zmniejsza prąd w obwodzie czujki, a to z kolei wywołuje alarm.

To proste i bezpieczne w działaniu urządzenie nie niesie żadnego niebezpieczeństwa, choć sam ameryk wchłonięty drogą pokarmową do organizmu może stać się dla niego zagrożeniem. Połknięcie dwutlenku ameryku, zawartego w czujce, nie spowodowałoby jednak istotnych konsekwencji, gdyż związek ten nie rozpuszcza się w wodzie i jest więc szybko wydalany przez organizm.

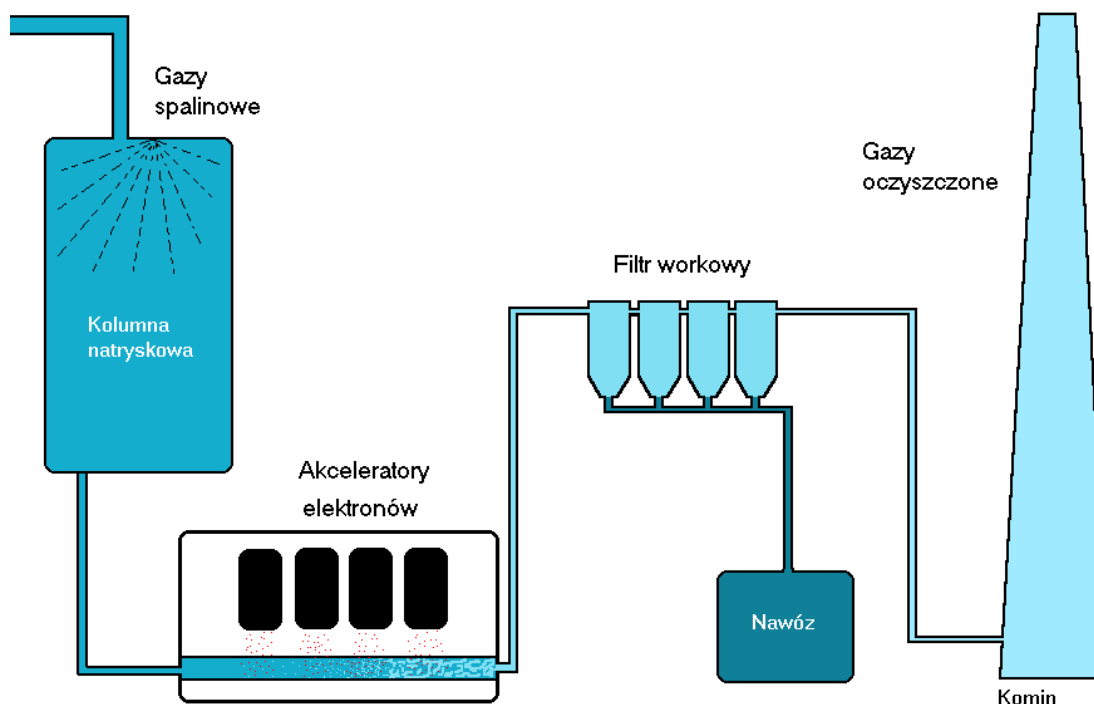
W niektórych fotokopiarkach, aby zapobiec gromadzeniu się statycznych ładunków elektrycznych, używa się innego izotopu alfa-promieniotwórczego, a mianowicie polonu (²¹⁰Po). Pewne ilości izotopów promieniotwórczych jak α-promieniotwórczy rad (²²⁶Ra) czy β-promieniotwórczy tryt (³H) znajdują się w farbach luminescencyjnych używanych w przyrządach stosowanych w nocy (np. w niektórych zegarkach). Nie stwierdzono ujemnego wpływu korzystania z tych zegarków na nasze zdrowie, a przecież globalna dawka związana ze "świeącymi" zegarkami jest około czterokrotnie wyższa niż pochodząca z energetyki jądrowej! Zmiana związków radowych na trytowe znacznie zmniejsza tę dawkę, niemniej jednak wciąż w szerokim użyciu są zegarki starych typów.

Radionuklidy są stale używane w znakach świeących, kompasach, tarczach telefonicznych, itp. Cząstki alfa używane były dla celów antystatycznych w szczoteczkach do odkurzania płyt gramofonowych i w sprzęcie fotograficznym. W szczególnie cienkich soczewkach optycznych zawarty jest czasem tor, który może napromieniowywać oczy dość znaczącą (co nie oznacza koniecznie – szkodliwą) dawką. Uran znajduje się czasem w sztucznych zębach, aby się lepiej błyszczały, ale niepotrzebną ceną za wrażenia estetyczne jest napromieniowanie dziąseł. Na szczęście obecnie odchodzi się od tego typu materiałów dentystycznych.

Techniki radiacyjne, tj. techniki korzystające z naświetlania materiałów promieniowaniem jonizującym, wykorzystuje się do modyfikacji własności ciał stałych, np. półprzewodników, do barwienia tkanin, szkła i kamieni jubilerskich. Te ostatnie działania polegają na wprowadzeniu do materiału odpowiednich defektów strukturalnych przez bombardowanie go wiązką neutronów, protonów, cząstek alfa itp. Przykładem takiego zastosowania może być produkcja tzw. membran trekowych i materiałów termokurczliwych.

Dzięki bombardowaniu folii polietylenowej ciężkimi jonami otrzymujemy w niej bardzo małe kanały - *treki* (od ang. *track* - ślad). W wyniku odpowiedniego chemicznego wytrawienia powstają siatki z otworami o żądanej średnicy np. 0,2 mikrometra. Tak wytworzone siatki stosuje się np. jako filtry w kroplówkach. Polietylen ma jeszcze jedną ciekawą cechę.

Naświetlony - zapamiętuje swój kształt. Możemy wytworzyć małe rurki, naświetlić je, a następnie rozciągnąć. Po podgrzaniu - rurki będą się kurczyły. Na tej zasadzie działają *rurki i taśmy termokurczliwe*, szeroko stosowane w przemyśle elektrycznym i elektronicznym.



Rys. 18.8 Schemat instalacji do oczyszczania gazów odlotowych przy użyciu akceleratorów elektronów

W ostatnim okresie wykorzystano techniki radiacyjne do *oczyszczania gazów odlotowych* (spalin) powstających w elektrowniach węglowych. Dzięki zjawisku wzbudzenia cząsteczek gazu za pomocą wiązki elektronów można utleniać związki siarki (SO_2) i azotu (NO_x). Po doprowadzeniu do ich reakcji z parą wodną i neutralizacji amoniakiem otrzymujemy nawozy sztuczne będące mieszaninami siarczanu amonowego (NH_4) $_2$ SO_4 i azotanu amonowego (NH_4) NO_3]. Cała stacja służąca do usuwania tych związków z gazów elektrociepłowni i wytwarzania nawozów jest dużo mniejsza i tańsza w budowie i eksploatacji od standardowych stacji oczyszczających, a uzyskiwane nawozy są chemicznie czystsze od uzyskiwanych dotychczasowymi metodami. Takie instalacje (których schemat pokazuje rys. 18.8) już działają w Elektrociepłowni Warszawa – Kawęczyn i w Elektrowni Dolna Odra. Napromieniowanie gazów wiązką elektronów zmniejsza emisję dwutlenku siarki o 98%, a tlenków azotu o 70-90%. Warto dodać, że Polacy mają patent na tę metodę wspólnie z Japończykami.

Promieniowanie jonizujące o dużym natężeniu i odpowiedniej energii może niszczyć żywe komórki - może więc zabijać drobnoustroje. Z tego względu używane jest często przy wytwarzaniu artykułów codziennego użytku, a także do *sterylizowania* materiałów medycznych (igieł, strzykawek, endoprotez, szkieł kontaktowych itp.). Promieniowanie

jądrowe wykorzystujemy też do higienizacji⁷ opakowań i kosmetyków. Sterylizację poprzez napromieniowanie prowadzi się już po szczelnym zapakowaniu przedmiotów.



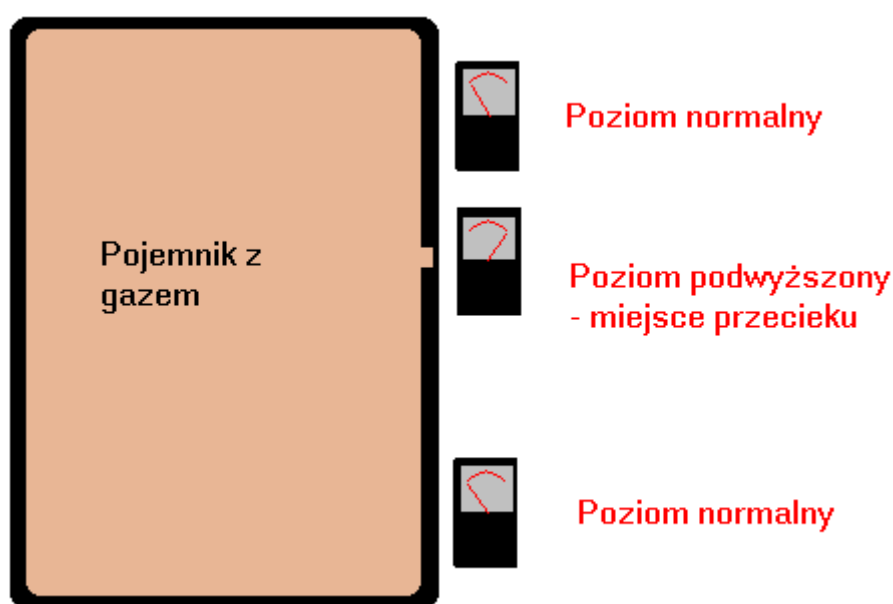
Rys. 18.9 Pieczarki szybko więdną, jednak po napromienieniu (z prawej) zachowują bardzo długo swój zdrowy wygląd i właściwości, a ich spożywanie nie stanowi najmniejszego zagrożenia dla życia człowieka

Napromieniowanie wiązką promieni γ jest jedną z metod *sterylizacji i utrwalania niektórych produktów żywnościowych*. Uszkodzenie pod wpływem promieniowania jonizującego kwasu dezoksyrybonukleinowego (DNA) powoduje zahamowanie podziału komórki i może doprowadzić do jej śmierci. W ten sposób promieniowanie skutecznie hamuje rozwój bakterii chorobotwórczych, niszczy grzyby i pleśnie oraz zabija szkodniki (owady, larwy, jaja), które mogą być obecne w konserwowanej żywności. Dlatego też napromieniowanie przypraw, warzyw (np. cebuli i ziemniaków), owoców (np. truskawek), skutecznie przedłuża trwałość wielu produktów żywnościowych, a żywność napromieniowana nie różni się w praktyce od żywności świeżej (w wyniku typowego napromieniowania żywności na każde 10 milionów cząsteczek napromieniowanego obiektu powstaje w wyniku przemian radiacyjnych tylko ok. 6 zmienionych cząsteczek. Są to te same cząsteczki, które obserwuje się w żywności podgrzewanej). W przypadku żywności, w której w okresie składowania zachowane są utajone procesy życiowe (np. w ziemniakach, cebuli, czosnku itp.), niskie dawki promieniowania wywołują korzystny efekt hamowania kiełkowania. Dawki używane przy hamowaniu kiełkowania, czy przy zwalczaniu szkodników nigdy nie przekraczają 0,5 kGy, w konserwacji żywności używa się dawek 5 - 10 kGy. W ten sposób chroni się owoce, cebulę, ziarno, pieczarki (patrz rys. 18.9), małe i mięso oraz przyprawy. Jest to bodaj najefektywniejsza z metod eliminacji zakaźnych drobnoustrojów, jak np. pałeczek słynnej Salmonelli. Napromieniowanie pozostawia żywność w stanie znacznie bliższym oryginalnemu niż czynią to chemiczne konserwanty, a sama metoda jest bezpieczna i efektywna. Warto wiedzieć, że dobranie właściwych dawek powoduje powstawanie możliwie niewielkich ilości nowych związków chemicznych w naświetlanej żywności,

⁷ W literaturze medycznej zwykle się odróżniać sterylizację, w którym to procesie materiał naświetla się dawką do 25 kGy (tak jest przy sprzęcie medycznym i biomateriałach zastępujących 14 różnych tkanek ludzkich), od higienizacji, kiedy to dawka nie przekracza 6 kGy (kosmetyki, opakowania itp.)

a związki te nie są dla ludzi szkodliwe. Naświetlanie nie zmienia własności odżywczych i powoduje znacznie mniejsze zmiany niż obróbka cieplna. A ponadto, ponieważ do naświetlania używane są zewnętrzne źródła promieniowania gamma (^{60}Co lub ^{137}Cs), naświetlana żywność nie staje się promieniotwórcza, podobnie jak człowiek nie zaczyna promieniować po prześwietleniu płuc!

Napromieniowanie zabija też insekty w ziarnie siewnym. Naświetlając promieniowaniem jonizującym owady, można doprowadzić do ich bezpłodności. Owady takie wypuszczone do swego naturalnego środowiska konkurują z innymi przedstawicielami swoich gatunków i doprowadzają do bardzo szybkiego zmniejszenia populacji na danym obszarze. Ta *metoda zwalczania owadów*, poprzez sterylizację, ma kilka znaczących przewag nad używaniem insektycydu: nie powoduje trucia innych istot żywych i powoduje znaczną redukcję populacji.

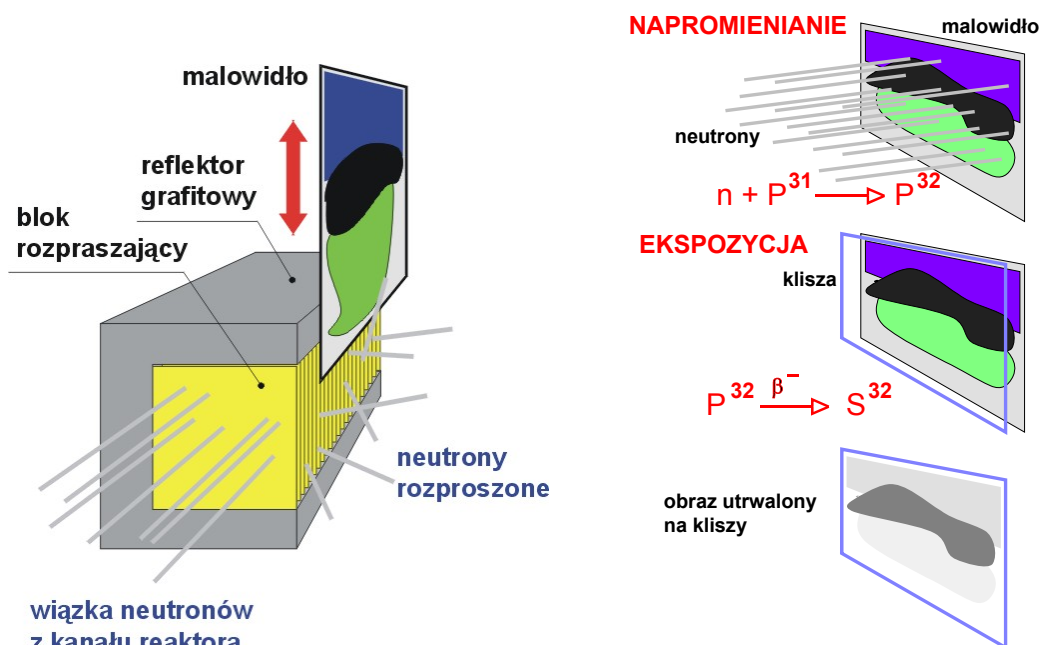


Rys. 18.10 Idea pomiaru szczelności zamkniętego zbiornika z gazem

Wprowadzając do badanego obiektu izotop promieniotwórczy możemy śledzić jego drogę w materiale śledząc miejsce emisji promieniowania. Taki izotop, zwany *znacznikiem promieniotwórczym*, może być więc użyty do badania prędkości przepływu materiałów, czy procesów mieszania się ze sobą (lub rozdzielania) dwóch lub więcej faz. Znaczniki można też stosować do badania stopnia zużycia materiału lub narzędzi pracy, procesu korozji, wykrywania nieszczelności zbiorników płynów i rurociągów. Na przykład, po dodaniu radioznacznika do zbiornika z gazem, patrz rys. 18.10, możemy radiometrem zbadać natężenie promieniowania na zewnątrz pojemnika. Podnoszenie się poziomu promieniowania w jakimś miejscu pojemnika będzie wskazywało na nieszczelność. Największe natężenie promieniowania zaobserwujemy w miejscu przecieku. Metoda ta jest całkowicie bezpieczna, ponieważ ilości i aktywności izotopów radioaktywnych mogą być bardzo małe a używane radioznaczniki nie wchodzą w skład łańcucha pokarmowego istot żywych.

Podobna technika służy *analizie przepływu wód gruntowych i przepływów zanieczyszczeń*. Wlewając do zbiornika niewielką ilość substancji promieniotwórczych powodujemy, że ciecz staje się lekko promieniotwórcza. Dzięki pomiarom w różnych punktach zlewiska możemy

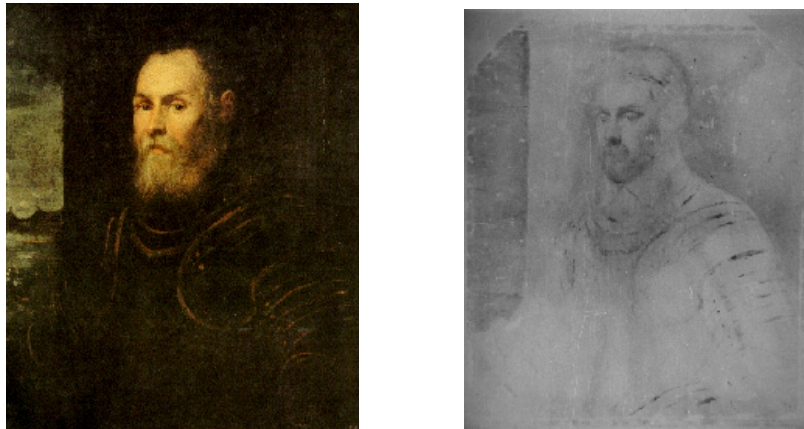
dowiedzieć się, gdzie rozplywa się woda lub ścieki. Ze względu na cechy stosowanych znaczników promieniotwórczych, metoda jest całkowicie bezpieczna, metoda jest całkowicie bezpieczna.



Rys. 18.11 Idea autoradiografii neutronowej: malowidło przesuwają w poprzek strumienia neutronów z reaktora, a wzbudzonym promieniowaniem naświetla się kliszę.

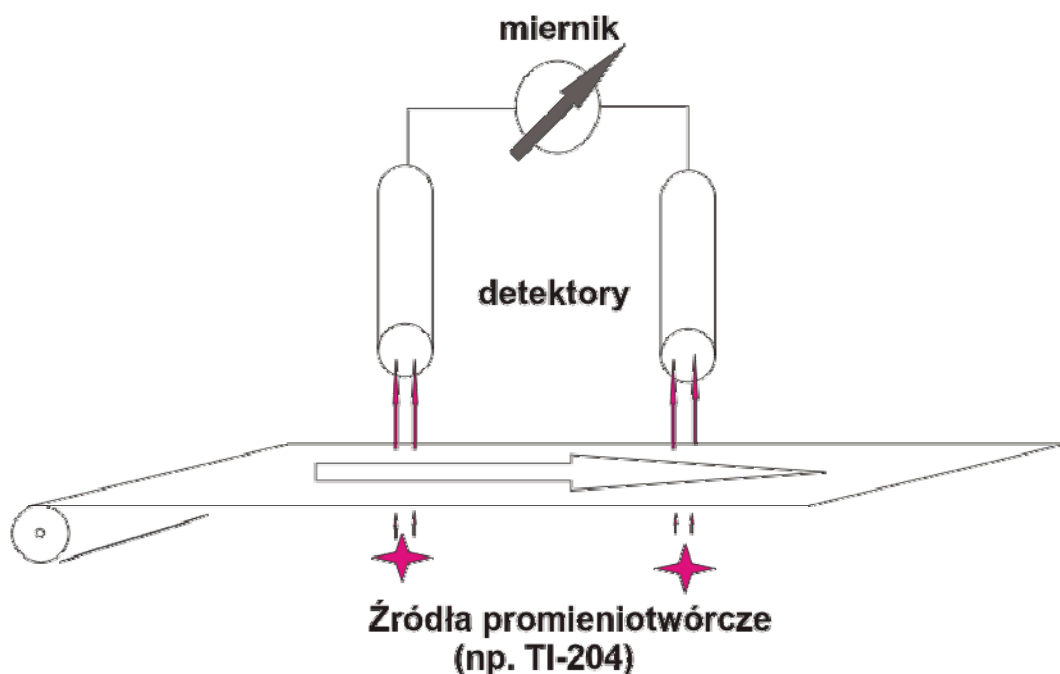
Na koniec należy wspomnieć o *analizie aktywacyjnej*, czyli technice pomiaru składu pierwiastkowego materiałów przy pomocy wzbudzania w atomach oraz jądrach atomowych badanego materiału promieniowaniem α , β , lub γ , które dla każdego izotopu poszukiwanego pierwiastka jest inne. W ten sposób możemy wykryć zanieczyszczenia w półprzewodnikach, wyznaczyć zawartość metali ciężkich w odpadach (takich jak np. popiół), określić zawartość azotu w ziarnach zbóż, zmierzyć koncentrację azotu, potasu i fosforu w nawozach sztucznych itp. Na szczególną uwagę zasługuje tu *neutronowa analiza aktywacyjna*. Jak sama nazwa wskazuje, punktem wyjściowym jest naświetlenie materiału neutronami. W obiekcie zachodzą reakcje wychwytu neutronów przez jądra atomowe. W ten sposób powstają nowe jądra, będące najczęściej izotopami promieniotwórczymi o znanych własnościach (okresach połowicznego zaniku i energii promieniowania γ). Natężenie mierzonego promieniowania o określonej energii pozwala na wyznaczenie zawartości poszukiwanego pierwiastka - czasem z niewiarygodnie wysoką precyzją.

Neutronową aktywację można zastosować do identyfikacji dzieł sztuki. Znając skład chemiczny farb w różnych epokach, możemy określić, kiedy dzieło powstało i czy jest oryginalne. Przykład techniki, którą posłużono się w Świerku w celu identyfikacji dzieła Tintoretta pokazany jest na rys. 18.12. Na „zdjęciach” możemy zobaczyć również wewnętrzne warstwy obrazów, co daje możliwość studiowania techniki pracy artystów. Tę metodę wykorzystuje się także w archeologii, oceanografii, kosmologii, geologii a także w technologiach materiałowych i górnictwie oraz w kryminalistyce.



Rys. 18.12 Przykład zastosowania autoradiografii neutronowej: obraz Tintoretta, jak go widzimy (z lewej strony) i jak go widać po naświetleniu neutronami (z prawej)

W przemyśle stosujemy rozmaite *radioizotopowe metody pomiarowe*. Ponieważ umiemy określić, jak bardzo jest osłabiane dane promieniowanie podczas przejścia przez różne rodzaje i grubości osłon, możemy budować urządzenia służące do pomiarów gęstości, grubości i stężenia substancji. Jako źródeł używamy w tym celu przede wszystkim cezu ^{137}Cs , kobaltu ^{60}Co i talu ^{204}Tl .



Rys. 18.13 Schemat działania miernika grubości papieru

Istotnie, w badaniach przemysłowych często wykorzystujemy zmianę absorpcji promieniowania jonizującego wynikającą z różnic grubości lub gęstości materiału. Na przykład, źródło promieniowania β może być użyte do pomiaru procesu grubości papieru podczas jego produkcji (rys. 18.13). W taki sam sposób można mierzyć grubość blachy, ważyć materiały w ruchu czy określać poziom cieczy w zamkniętych zbiornikach. Można używać promieniowania do analiz szczelności gazociągów, jakości spawów, czy korozji metali. Można też łatwo mierzyć np. poziom wypełnienia zbiornika danym materiałem, np. wypełnienie silosu ziarnem. Podobnie, jak w badaniach nieszczelności zbiorników z gazem, tu także przejeżdża się układem źródła i detektora (umieszczonych po przeciwnych stronach zbiornika) i sprawdza się miejsce, w którym następuje zasadnicza zmiana rejestrowanego natężenia. Jego spadek w określonym miejscu oznacza, że począwszy od tego miejsca zbiornik jest pusty.

Warto podkreślić, że korzystając z radioizotopów staramy się wykorzystywać izotopy krótkożyciowe, co istotnie zmniejsza uciążliwość dalszego postępowania z pozostałymi po takich procedurach odpadami promieniotwórczymi.

Urządzenia, na które warto tu zwrócić uwagę, to wagi izotopowe, czy mierniki zapylenia powietrza.

Wagi izotopowe służą do bezdotykowego określenia masy substancji np. węgla. Umieszczając nad ładunkiem źródło i mierząc natężenie promieniowania detektorem po drugiej stronie, jesteśmy w stanie określić całkowitą masę węgla. Wagi izotopowe są stosowane przede wszystkim w elektrociepłowniach, ponieważ pozwalają na określenie zużycia węgla w każdej godzinie, dniu i miesiącu.

Mierniki zapylenia powietrza działają dzięki zjawisku osłabiania promieniowania (stosujemy tu z reguły promieniowanie β) przechodzącego przez materię. Osadzający się na filtrze pył stanowi barierę dla promieniowania. Mierząc absorpcję promieniowania i znając objętość przepuszczonego przez filtr powietrza można wyznaczyć zapylenie środowiska. Jest to w gruncie rzeczy inna metoda określania masy substancji, w tym wypadku – osadzonych pyłów.

W zasadzie ta sama idea pomiarowa leży u podstaw *defektoskopii* materiałów. Ustawiając źródło po jednej stronie badanej substancji, a radiometr po drugiej i przesuując je równoległe do siebie, jesteśmy w stanie określić, po zmianie liczby zliczeń, miejsce położenia defektu. Metoda ta szeroko stosowana jest do kontroli rurociągów. Izotopem najczęściej używanym w defektoskopii jest ^{137}Cs .

Nauka posługuje się znacznikami promieniotwórczymi przy wytwarzaniu nowych lekarstw, badaniach rolniczych, tworzeniu i rozwoju odmian roślin odpornych na choroby, produkcji nawozów. Znaczniki promieniotwórcze stosuje się w wielu dziedzinach nauki: od biologii, medycyny czy agrotechniki do archeologii i nauk o Ziemi. Małe ilości materiałów promieniotwórczych służą do obserwacji ruchów różnych zanieczyszczeń w środowisku. W geologii określa się wiek skał i bada dryf kontynentalny na podstawie zawartości odpowiednich radionuklidów naturalnych w skałach. Archeolodzy szeroko korzystają z badań zawartości izotopu węgla ^{14}C dla określania wieku znalezisk organicznych

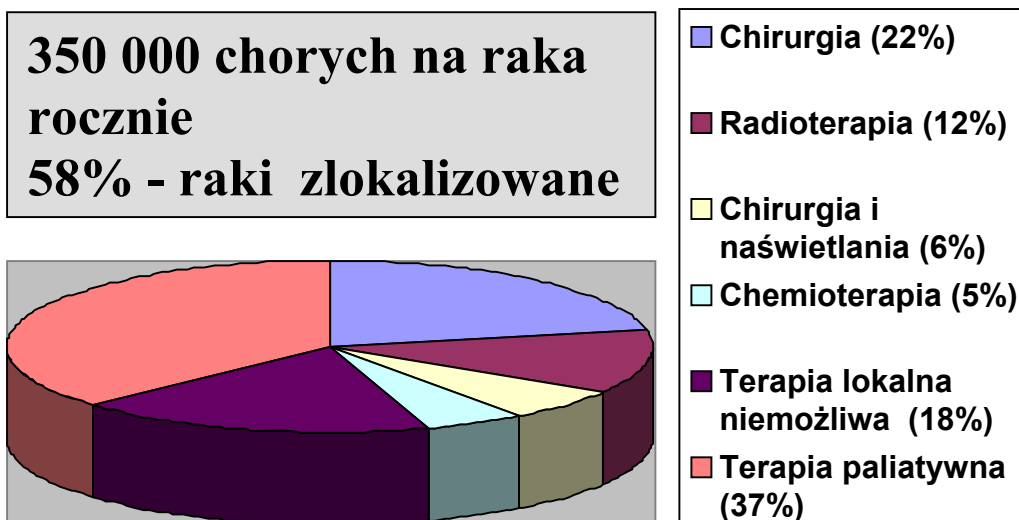
Reasumując:

- Promieniowanie jądrowe służy badaniu materiału, ale nie wprowadza doń promieniotwórczości. Przykładami są tu badania np. grubości spawów, czy wzbudzenie tzw. fluorescencji rentgenowskiej celem zbadania składu pierwiastkowego obiektu: promieniowanie jądrowe pobudza tutaj jedynie atomy (a nie jądra) do promieniowania i takie pobudzenie nie powoduje zmian składu chemicznego badanej substancji.
- Promieniowanie jądrowe inicjuje przemiany jąder atomowych badanego materiału, w wyniku czego powstają nowe izotopy lub pierwiastki. Jeżeli są one promieniotwórcze, możemy je zidentyfikować mierząc powstające promieniowanie α , β lub γ . W wyniku zaistniałych przemian jądrowych skład chemiczny obiektu może ulec zmianie.
- Promieniowanie jądrowe służy zmianie własności materiału: zabijane są bakterie, pleśnie, insekty, modyfikuje się strukturę i inne własności fizyczne ciał stałych.
- Badania dotyczą zawartości różnych izotopów (zarówno stabilnych jak i promieniotwórczych) znajdujących się w materiale (np. w badaniach geologicznych, geofizycznych, astrofizycznych czy badaniu zawartości węgla ^{14}C w archeologii).

Musimy jednak pamiętać, iż stosowanie materiałów promieniotwórczych w działalności człowieka zawsze prowadzi do powstania odpadów promieniotwórczych, głównie nisko- i średnioaktywnych. Brak dziś energetyki jądrowej w Polsce powoduje, że niewielka produkcja odpadów wysokoaktywnych jest jedynie wynikiem eksploatacji reaktora badawczego MARIA w Świerku. W Polsce ponad 90% odpadów promieniotwórczych pochodzi z działalności na rzecz ochrony zdrowia! O postępowaniu z nimi mieliśmy okazję już mówić w rozdz. IX.

18.4 Energia jądrowa w medycynie

W potocznej opinii energia jądrowa łączy się z bombardowaniami Hiroszimy, Nagasaki, awarią reaktora w Czarnobylu i nadzwyczaj przesadnymi opiniami o fatalnych dla zdrowia ludzkości skutkach tych wydarzeń. Wielokrotnie nawiązywaliśmy do tego tematu i pokazywaliśmy, jak bardzo społeczna radiofobia nie znajduje gruntu w faktach. Nie ulega wątpliwości, że śmierć 150 – 200 tysięcy ofiar bombardowań w Hiroszynie i Nagasaki była nadzwyczaj bolesnym i przerażającym doświadczeniem (należy jednak wiedzieć, że większość zginęła nie z powodu promieniowania lecz podmuchu i gorąca). Jeśli jednak uwzględnimy jego nadzwyczajność, związaną z II Wojną Światową, na obraz promieniowania jonizującego powinniśmy patrzeć także przez pryzmat milionów uratowanych istnień ludzkich dzięki zastosowaniu promieniowania jądrowego w medycynie. Zastosowania te są przede wszystkim w diagnostyce medycznej i w radioterapii, ale też nie należy pomijać badań laboratoryjnych prowadzonych z użyciem izotopów promieniotwórczych, gdyż te też mają swój znaczący udział w ratowaniu zdrowia. Dla zilustrowania problemu warto uświadomić sobie, że gdy w Kanadzie załoga ośrodka Chalk River, produkującego izotopy promieniotwórcze, zagroziła strajkiem, zdano sobie sprawę, że jego konsekwencją byłaby konieczność zaprzestania w USA i Kanadzie około 47000 badań diagnostycznych dziennie (!). W tych krajach około 200 000 pacjentów jest rocznie poddawanych terapii z użyciem źródeł promieniowania jonizującego. Z kolei dane dla Niemiec ilustruje rys. 18.14. Jak widać, radioterapia i chirurgia połączona z naświetlaniami stanowi 18% całości procedur. Jeśli pominiemy terapię paliatywną i sytuacje, w których medycyna nie jest w stanie pomóc, okaże się, że promieniowanie jonizujące wykorzystywane jest w 40% stosowanych zabiegów.



Rys. 18.14 Dane o rakach i metodach ich leczenia w Niemczech

Zakłady medycyny nuklearnej czy oddziały radiologiczne znajdują się w wielu szpitalach. Promieniowanie służy zarówno do diagnostyki (zdjęcia rentgenowskie klatki piersiowej, kości czy zębów), jak i do terapii (źródłem promieniotwórczym jest tu izotop kobaltu ^{60}Co stanowiący serce tzw. *bomby kobaltowej*, patrz rys. 18.15). Promieniowanie jonizujące, ściślej – promieniowanie rentgenowskie o wysokiej energii, mogące skutecznie unieszkodliwić rozmnażające się w niekontrolowany sposób komórki rakowe, możemy wytworzyć w medycznym akceleratorze elektronów (jak np. NEPTUN czy Co-line pokazane na rys. 18.16), w którym wysokoenergetyczna wiązka elektronów uderza w tarczę metalową, w wyniku czego powstaje promieniowanie rentgenowskie. Promieniowanie to dociera do pacjenta przez odpowiedni system kolimatorów.

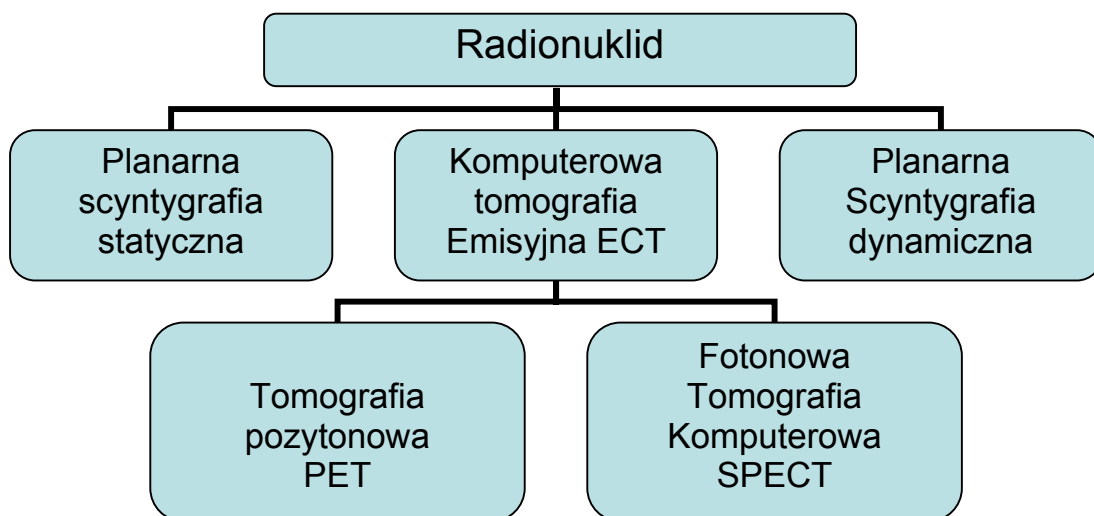


Rys. 18.15 Bomba kobaltowa – ważne narzędzie w terapii nowotworów



**Rys. 18.16 Akceleratory medyczne
NEPTUN i Co-line prod. ZdAJ - Świerk**

W ostatnim okresie zaczęto wykorzystywać ciężkie cząstki i jony (hadrony) do terapii nowotworów. Ta nowoczesna i bardzo kosztowna technika wykorzystuje z jednej strony możliwość dotarcia cząstki na odpowiednią głębokość (sterowanie energią cząstki), z drugiej zaś przemieszczaniem promieniowaniem guza nowotworowego przy pomocy magnetycznego odchylenia wiązki. Istotą terapii jest tu jednak przede wszystkim fakt, że największa jonizacja następuje w stosunkowo wąskim obszarze, w którym cząstka zatrzymuje się. Jest rzeczą oczywistą, że tak dobieramy parametry wiązki, aby działało się to w obszarze guza.



Rys. 18.17 Techniki obrazowania medycznego dla celów diagnostycznych

Medycyna nuklearna, wykorzystując źródła izotopowe, wykrywa szereg schorzeń zanim wystąpią symptomy choroby i zapobiega niepotrzebnym zabiegom chirurgicznym. Skanowanie czy obrazowanie, dzięki którym możemy wykryć zmiany w kościach i innych organach, jest z reguły poprzedzone podaniem pacjentowi substancji promieniotwórczej, której promieniowanie jest następnie monitorowane przez system detektorów. Dzięki podaniu odpowiednich ilości *radiofarmaceutyków*, które gromadzą się w tkance nowotworowej, można określić zarówno miejsce guza, jak i zniszczyć go, nie niszcząc przy tym zdrowej tkanki w jego sąsiedztwie.

Znaczniki izotopowe pozwalają badać procesy biologiczne zarówno w żywym organizmie (*in vivo*), jak i po wypreparowaniu tkanek czy płynów ustrojowych (*in vitro*).

Typowymi izotopami wykorzystywanymi w tym celu są jod ^{131}I (używany również do terapii radioizotopowej) oraz technet $^{99\text{m}}\text{Tc}$. Część analiz można prowadzić bez kontaktu pacjenta z izotopami promieniotwórczymi. Niektóre izotopy (np. jod ^{125}I czy tryt ^3H) używane są w rutynowych analizach chemicznych, w których określa się poziom hormonów, czy cechy krwi i moczu. Różne techniki stosujące radionuklidy w medycynie nuklearnej, a ściślej mówiąc – w obrazowaniu organów wewnętrznych, pokazane są schematycznie na rys. 18.17.

Podstawową sprawą w danej procedurze jest uzyskanie właściwego radionuklidu. Ten może powstać w drodze reakcji jądrowej zainicjowanej cząstką-pociskiem z akceleratora, może jednak też być wytworzony w reaktorze jądrowym bądź w drodze naświetlenia tarczy strumieniem neutronów, bądź jako produkt rozszczepienia cięższego nuklidu.

Otrzymana aktywność wyprodukowanych izotopów zależy od kilku czynników, jak

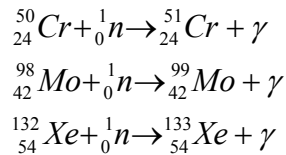
- strumień cząstek – pocisków Φ , tj. liczba cząstek przypadająca w czasie 1 s na powierzchnię 1 cm^2 ,
- liczba N jąder w tarczy,
- przekrój czynny σ na daną reakcję,
- czas napromienienia t ,
- stała rozpadu λ produkowanego izotopu promieniotwórczego.

Sprawy te omawialiśmy w rozdz. XII. Otrzymywaną aktywność produkowanych nuklidów promieniotwórczych można obliczyć z bardzo prostego wzoru:

$$A = \Phi \cdot N \cdot \sigma \cdot (1 - e^{-\lambda t}) \quad (18.1)$$

gdzie znaczenie symboli podaliśmy wyżej. Z powyższego wzoru łatwo wynika, że długie naświetlanie (w stosunku do czasu życia produkowanego izotopu) w reaktorze nie jest opłacalne, gdyż naświetlając tarczę dłużej niż około połowy połowicznego okresu zaniku w zasadzie nie zyskujemy na wytwarzanej aktywności, natomiast znakomicie podwyższamy koszt produkcji.

Typowymi reakcjami wykorzystywanymi do produkcji izotopów dla celów medycyny nuklearnej są np.

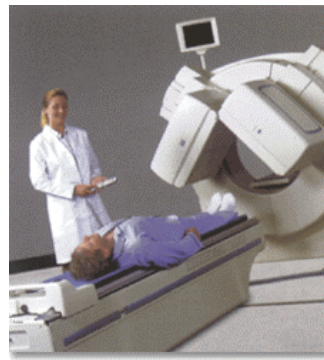
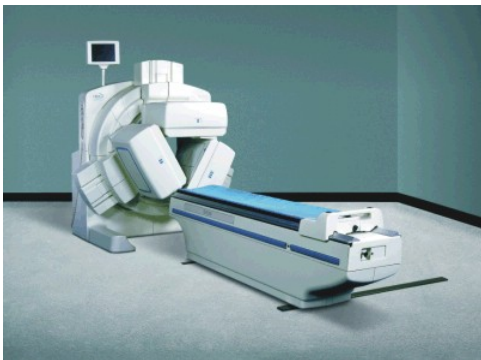


${}^{51}\text{Cr}$ używany jest do znakowania czerwonych ciałek krwi i skanowania śledziony;
 ${}^{99}\text{Mo}$ jest źródłem („krową”) dla ${}^{99\text{m}}\text{Tc}$ („mleka”) – najczęściej używanego radionuklidu;
 ${}^{133}\text{Xe}$ jest wykorzystywany do badania wentylacji płuc.

Typowym izotopem powstającym w reaktorze i wykorzystywanym w medycynie nuklearnej jest ${}^{131}\text{I}$ oraz ${}^{99}\text{Mo}$ – jądro macierzyste dla ${}^{99\text{m}}\text{Tc}$. Jak pokazywaliśmy wcześniej, pierwszy z tych izotopów jest przydatny w radioterapii. Drugi, ze względu na okres połowicznego zaniku ok. 6 godzin jest silnie eksploatowany w diagnostyce.

Wprowadzenie do organizmu radiofarmaceutyka powoduje, że z interesującego nas narządu wydobywa się promieniowanie gamma, którego natężenie można zmierzyć całościowo, a więc w sposób pozwalający ocenić stopień wchłonięcia się specyfiku, bądź też obejrzeć rozkład natężenia wydobywającego się promieniowania. Taki rozkład jest tożsamy z rozkładem przestrzennym wchłonięcia radiofarmaceutyka przez dany narząd, co pozwala nam wydać diagnozę stanu tego narządu. Najpopularniejszym przyrządem służącym do obserwacji tego typu jest tzw. gamma-kamera, która może być jedno- lub wielogłowicowa, jak pokazana na rys. 18.18.

Wzrastająca potrzeba posiadania izotopów promieniotwórczych dla celów medycznych jest zjawiskiem światowym, szczególnie zaznaczonym w krajach wysoko rozwiniętych. Od roku 1995. w USA zaobserwowano wykładniczy wzrost tego zapotrzebowania. Jak się ocenia, w okresie 2000-2020 zapotrzebowanie na izotopy promieniotwórcze dla samej terapii wzrośnie 100 razy! Podobnego, niemal wykładniczego wzrostu należy spodziewać się w Europie.



Rys. 18.18 Wygląd typowych gamma-kamer: dwu- i trójgłowicowych.

Kamera obracając się wokół pacjenta wykonuje serię zdjęć pokazujących rozkład natężenia promieniowania w funkcji kąta, pod którym ono wychodzi z pacjenta. W ostatnim etapie dokonuje się rekonstrukcji obrazu tomograficznego.

Wśród pierwiastków promieniotwórczych jod (I) gra szczególną rolę, gdyż jest łatwo i selektywnie wchłaniany przez tarczycę. Pozwala to na wykorzystanie go w niewielkich dawkach dla celów diagnostycznych, a także może służyć do terapii raka tarczycy, niszczonego promieniowaniem jodu znajdującego się wewnątrz tarczycy. W takiej sytuacji jest stosunkowo łatwo dostosować dawkę terapeutyczną do rozmiaru guza. Izotop jodu ^{131}I (promieniotwórczość β , γ o połowkowym okresie zaniku 8 dni) od ponad 50 lat jest wykorzystywany do badań czynności tarczycy.

Z kolei $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (metastabilny stan wzbudzony technetu-99 o okresie połowicznego rozpadu 6 godzin) jest także bardzo dobrym znacznikiem promieniotwórczym, wykorzystywanym do badań mózgu, wątroby, płuc itd. Rad i stront, jako nuklidy promieniotwórcze, są wykorzystywane do badań struktur kostnych.

Najbardziej interesującymi z fizjologicznego punktu widzenia są takie pierwiastki jak C (węgiel), N (azot), O (tlen). Pierwiastki te mają krótkożyłowe izotopy emitujące pozytony i są stosowane w technice PET⁸. W użyciu są następujące emitery pozytonów: ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O oraz ^{18}F (Fluor).

Jest rzeczą oczywistą, że promieniowanie jonizujące, które używane jest dla celów diagnostycznych lub terapeutycznych może też nieść ze sobą negatywne dla zdrowia skutki. W związku z tym, przed podjęciem decyzji o użyciu źródeł promieniotwórczych, naturalnych lub sztucznych, lekarz musi mieć pewność, że zyski z zastosowania procedury są wielokrotnie większe niż potencjalne szkody. Zarówno pacjent, jak i personel medyczny muszą działać w taki sposób, aby zminimalizować narażenie.

18.5 Zastosowanie energii jądrowej w archeologii i historii sztuki⁹

Najpowszechniej chyba znaną metodą jądrową stosowaną w archeologii i historii sztuki jest *datowanie*, tj. badanie wieku obiektów różnego rodzaju znalezisk archeologicznych, obrazów i innych dzieł sztuki. Dotychczas opracowano kilkanaście metod datowania z wykorzystaniem wiedzy na temat izotopów promieniotwórczych. Dla znalezisk organicznych najbardziej podstawową pozostaje metoda węgla ^{14}C . Metoda ta opiera się na fakcie, że wszystkie żywe organizmy w trakcie swojego istnienia wymieniają z otoczeniem węgiel. W węglu znaną domieszkę stanowi kosmogenny¹⁰, promieniotwórczy izotop ^{14}C , o okresie połowicznego zaniku 5730 lat. Po śmierci organizmu „dowóz” węgla z pokarmem ustaje, a zawartość ^{14}C zaczyna spadać ze względu na rozpad promieniotwórczy tego izotopu. Stąd wiemy, że organizm, u którego jest np. 4 razy mniej węgla radioaktywnego niż normalnie, zmarł 11460 lat temu. Innymi słowy, do takiego datowania można użyć pomiaru stosunku zawartości izotopu ^{14}C do ^{12}C . Na rys. 18.19 pokazany jest spektrometr mas służący właśnie do tego celu.

⁸ O tej, jak i innej technice diagnostycznej, SPECT, można dowiedzieć się więcej z wykładu L.Dobrzyński, „Podstawy fizyczne medycyny nuklearnej” <http://alpha.uwb.edu.pl/ludwik>

⁹ W tym paragrafie korzystamy przede wszystkim z materiałów „Czym zajmuje się fizyka i technika jądrowa”, zamieszczonych na stronie internetowej www.ipj.gov.pl

¹⁰ Izotop ten tworzy się w wyniku reakcji neutronów spalacyjnych z jądrami azotu. Neutrony zaś powstają w reakcjach kruszenia wysokoenergetycznych protonów z jądrami atmosfery. W wyniku reakcji z tlenem powstaje $^{14}\text{CO}_2$, który dociera do powierzchni Ziemi i jest przyswajany przez rośliny. Te z kolei są spożywane przez zwierzęta itd.



Rys. 18.19 Spektrometr mas służący do określania stosunku $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ w badanej, kilkumiligramowej próbce

Za pokazanie możliwości datowania tą metodą Willard Libby otrzymał w roku 1960 Nagrodę Nobla. Zgodnie z obliczeniami Libby'ego, ilość izotopu ^{14}C na Ziemi jest znikoma: zaledwie 80 ton (98,9% węgla w przyrodzie, to stabilny izotop ^{12}C , a niemal cała reszta, ok. 1,1%, to inny izotop stabilny – ^{13}C . Zawartość ^{14}C , to około $10^{-10}\%$!). Jego czas życia w zasadzie nie pozwala na dobre wyznaczenie wieku obiektu powyżej około 50 tysięcy lat, natomiast eksperymentalne osiągnięcie precyzji datowania poniżej 100 lat też nie jest łatwe. W datowaniu należy bowiem uwzględniać cały szereg okoliczności, które mogły zmienić w danym okresie względną zawartość izotopu ^{14}C . Choćby wzmożona aktywność Słońca, zwiększona emisja dwutlenku węgla do atmosfery, prowadzone w swoim czasie próbnym wybuchy jądrowe – wszystko to powoduje efektywne zmiany tej zawartości. Natomiast możemy przyjąć z zupełnie dobrym przybliżeniem, że intensywność promieniowania kosmicznego, decydującego o zawartości ^{14}C w atmosferze w zasadzie nie zmieniała się przez szereg ostatnich tysięcy lat a nawet kilkudziesięciu tysięcy lat.

Jeśli aktywność ^{14}C w chwili przerwania jej przemian (metabolizmu) wynosiła A_0 (aktywność charakterystyczna dla żywego organizmu), natomiast zmierzona i odniesiona do roku 1950-go (przyjęty standard międzynarodowy) aktywność próbki wynosi A , to wiek próbki można obliczyć ze wzoru:

$$t = \frac{T_{1/2}}{\ln 2} \ln \frac{A_0}{A}, \quad (18.1)$$

gdzie $T_{1/2} = 5730$ lat.

Niewątpliwie metoda węglowa nie nadaje się do datowania wieku skał i minerałów, podobnie jak samego węgla czy ropy naftowej, gdyż w tym wypadku czas życia izotopu ^{14}C jest znacznie krótszy i można z dobrym przybliżeniem przyjąć, że tego izotopu po prostu tam nie ma. Tu można efektywnie wykorzystać metody oparte na pomiarze zawartości izotopów ołowiu pochodzących z rozpadów promieniotwórczych uranu i toru. I tak izotopy ^{206}Pb , ^{207}Pb i ^{208}Pb są produktami końcowymi szeregów promieniotwórczych odpowiednio ^{238}U ($T_{1/2} = 4,5 \cdot 10^9$ lat), ^{235}U ($T_{1/2} = 0,7 \cdot 10^9$ lat) i ^{232}Th ($T_{1/2} = 1,2 \cdot 10^{10}$ lat), których okresy połowicznego zaniku znamy ze względnie dużą dokładnością. Ponieważ wszystkie te trzy izotopy ołowiu wciąż się tworzą, więc znajomość pierwotnych proporcji izotopów oparto na analizie materiałów, w których uran czy tor nie występują, jak w meteorytach żelaznych lub występujących w naturze minerałach typu galeny (kryształów siarczku ołowiu - PbS). W tych standardach powstałe izotopy pochodzą bezpośrednio z nukleosyntezy (należy tu uwzględnić np. izotop ^{204}Pb) oraz z izotopów powstałych w wyniku rozpadów uranu i toru zanim nastąpiło oddzielenie się ołowiu tworzącego galenę. Zawartość pochodzącego wyłącznie z nukleosyntezy ^{204}Pb w badanej próbce jest wskaźnikiem oryginalnej ilości zwykłego ołowiu.

Niewątpliwie zegar mierzący nam czasy geologiczne musi być oparty na izotopach, które rozpadają się w porównywalnych czasach. Oprócz omówionego zegara uranowo-ołowiowego stosuje się także *datowanie potasowo-argonowe*, w którym korzysta się z faktu, że w 10,7% rozpadów beta izotopu ^{40}K tworzy się izotop argonu ^{40}Ar . Metoda ta jest stosowana do obiektów o wieku 100 tysięcy do 3 milionów lat. Innym wariantem jest *datowanie rubidowo-strontowe*, w którym korzystamy z przemiany beta nuklidu ^{87}Rb ($T_{1/2} = 4,8 \cdot 10^{10}$ lat) w ^{87}Sr .

Ponieważ liczba jąder pierwiastków wyjściowych zmienia się jak $e^{-\lambda t}$, gdzie λ jest stałą rozpadu, podczas gdy liczba jąder pochodnych wzrasta jak $1 - e^{-\lambda t}$, stosunek liczby jąder pochodnych do macierzystych po czasie t wynosi

$$\frac{N_k}{N} = \frac{1 - e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda t}} = e^{\lambda t} - 1 \quad (18.2)$$

W datowaniu potasowo-argonowym początkowa wartość $N_k/N=0,107$. Mając zatem zmierzoną względną zawartość obu izotopów wystarczy podzielić ją przez 0,107 i przyrównać wynik do prawej strony równania (18.2) aby uzyskać wiek t obiektu.

Dokładność określenia wieku w ewidentny więc sposób zależy od naszej pewności, że od momentu rozpadu liczba jąder macierzystych nie zmieniała się, a także jądra powstałe w szeregu promieniotwórczym, jak np. radon, nie ulegały z próbką. Ponieważ zawartość ^{14}C w atmosferze nie jest stała w czasie, koniecznością jest kalibrowanie dat otrzymywanych przy użyciu ^{14}C w oparciu o inne techniki. Jedną z nich jest *dendrochronologia*, wykorzystująca przyrost słoju drzewnych. Metoda ta pozwala na wyznaczenie okresu około 11400 lat. Dla wyznaczenia wieku w granicach 10000 do 30000 lat korzysta się z kalibracji uranowo-torowej koralu. Wyniki datowań z użyciem ^{14}C dotyczą czasów z reguły krótszych niż w powyższych dwóch technikach. Ograniczenie bierze się między innymi ze zmian produkcji ^{14}C w atmosferze. Dla właściwej kalibracji zawartości ^{14}C korzysta się zatem z datowania przy pomocy słoju drzewnych, jeśli interesuje nas okres ostatnich 12000 lat, a koralu i osadów w jeziorach, jeśli wyznaczamy jeszcze starsze lata. Inną jeszcze techniką datowania¹¹ jest metoda uranowo-torowa. Korale w czasie swego życia pochłaniają uran,

¹¹ Zarówno o tej, jak i kilku innych metodach datowania można dowiedzieć się nieco więcej na stronach www.ipj.gov.pl w materiale edukacyjnym „Czy zajmuje się fizyka i technika jądrowa”

w tym izotop ^{234}U (okres połowicznego zaniku 245500 lat) będący w morzu, nie absorbują jednak też tam obecnego izotopu toru - ^{230}Th . Gdy koral umrze, ^{230}Th o okresie połowicznego zaniku 75380 lat, pochodzący z promieniotwórczego rozpadu tego izotopu uranu, kumuluje się w szkielecie koralu. Mierząc stosunek zawartości uranu i toru można zatem wyznaczyć wiek koralu. Metoda uranowo-torowa wykorzystywana jest do datowania szkieletów, kopalin i zębów, których wiek zawiera się w granicach 10000 do 350000 lat. Jeśli próbka jest starsza niż 30000 lat albo nie zawiera węgla, metoda ta, oparta na promieniowaniu uranu, jest jedyną, dającą się zastosować.

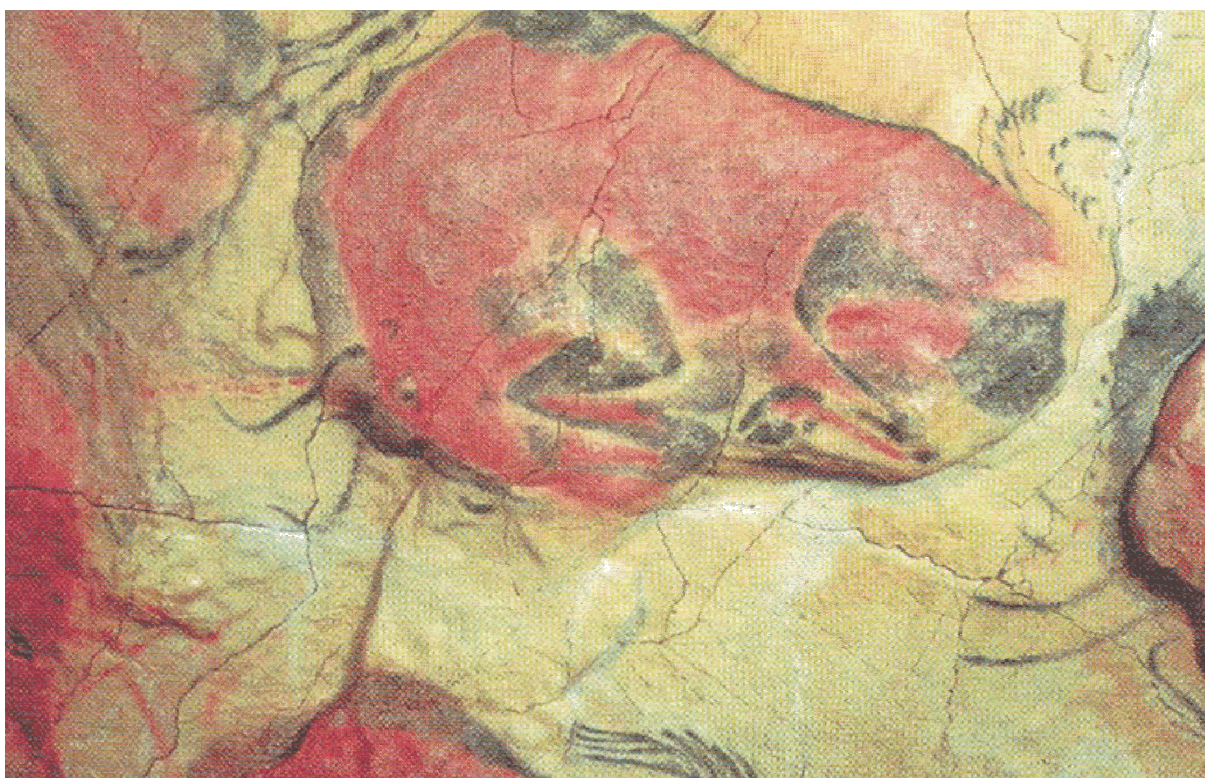
Poniżej podajemy stosunkowo niedawny przykład nietypowej analizy „człowieka lodowego”, znalezionej w 1991 roku (rys.18.20).



Rys. 18.20 Częściowo zamrożone ciało człowieka lodowego, Otzi'ego, w chwili odkrycia w roku 1991 w Alpach na granicy Austriacko-Włoskiej.

We wrześniu 1991 roku dwóch turystów znalazło w górach ciało mężczyzny wystające w połowie spod lodu. Człowiek lodowy (nazwany później pieszczotliwie Otzi: zgodnie z rejonem górskim, w którym został znaleziony) zmarł zapewne ponad 4 000 lat temu. Otzi'ego badano ponad 6 lat na Uniwersytecie w Innsbrucku. Pomiary zawartości ^{14}C przeprowadzono (w laboratoriach w Zurichu i Oxfordu), wykorzystując zarówno miligramowe ilości kości i tkanek Otzi'ego, jak i ekwipunku oraz materiałów ewidentnie należących do Otzi'ego, a także osadów zebranych z miejsca znaleziska (badania w Wiedniu). Wiek bez pełnej kalibracji wynosi 4550 lat przed chwilą obecną. Po kalibracji wykorzystującej krzywe otrzymanywane ze słoii drzewnych, wiek ustalono na starszy o 650 lat. Analiza ziaren znalezionych w jelitach, jak również minerałów znajdujących się we włosach prowadzi do wniosku, że Otzi szedł z południowego Tyrolu, gdy zaskoczył go śnieg i lód. Ponadto, analizując izotopowy skład węgla i tlenu w zębach i kościach człowieka lodowego, badacze mogą rozróżnić kraj jego wczesnego dzieciństwa i kraj, w którym przebywał później.

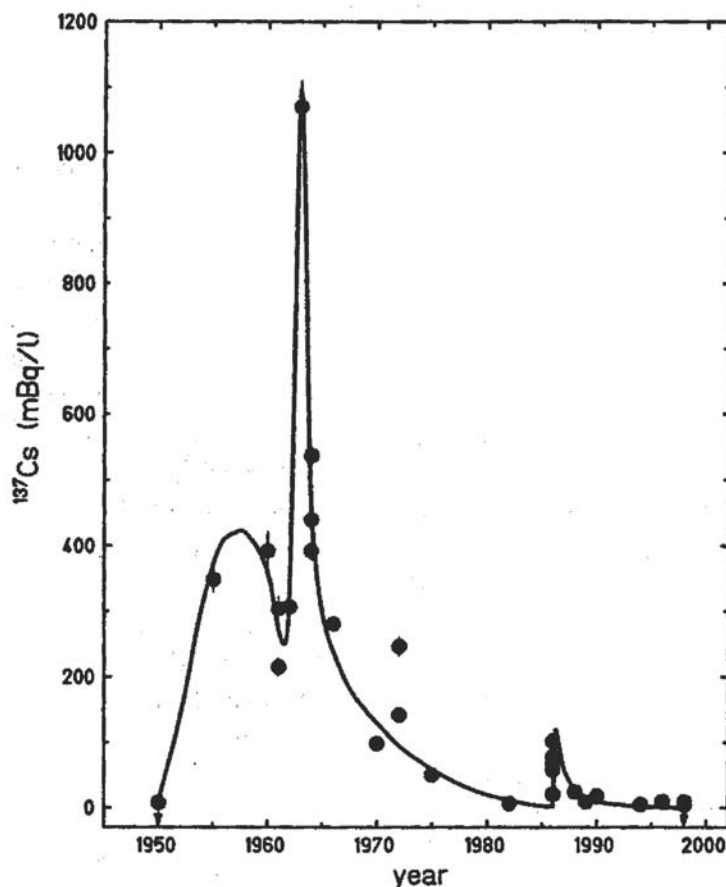
Na rys. 18.21 podajemy przykłady obrazów naskalnych, których wiek określono metodą datowania węglem-14. Tradycyjne datowanie węglem polega na pomiarze promieniowania beta izotopu ^{14}C . Metoda ta wymaga jednak użycia stosunkowo dużej próbki. Na przykład, próbując określić wiek malowidła naskalnego w Altamirze (Płn. Hiszpania), pokazanego w dolnej partii rys. 18.21, musielibyśmy trochę zniszczyć to malowidło. Metody akceleratorowe, a ściśle – spektrometrii masowej, określania zawartości poszczególnych izotopów wymagają znacznie mniejszych ilości próbek. Wystarczyło zeszkrobać przy użyciu skalpela ok. 20-40 mg z ciemnego fragmentu malowidła, aby uzyskać węgiel potrzebny do badań. Datowanie węglem-14 węgla drzewnego użytego do malowania tego obrazu pozwoliło ustalić wiek malowidła na $14\ 000 \pm 400$ lat.



Rys. 18.21 Obrazy naskalne, których wiek ustalano metoda datowania ^{14}C

Do szczególnego rodzaju datowania nadaje się śledzenie zawartości trytu w zamkniętych zbiornikach wodnych. Tryt jest, jak wiadomo kosmogenny, ale też pojawia się w atmosferze wskutek wybuchów jądrowych i awarii reaktorów. Jeśli wraz z opadem dostanie się do wody, a następnie dopływ atmosfery zostanie przerwany, zawartość promieniotwórczego trytu może stanowić też wskaźnik wieku zamkniętego pojemnika (okres połowicznego zaniku trytu, to 12,32 lat). Pomiar nie jest łatwy, gdyż koncentracje trytu są generalnie szalenie małe, więc w pomiarze należy zapewnić nadzwyczajnie niski poziom tła pomiarowego. Na dobrą sprawę, to co się mierzy to jądro pochodne rozpadu trytu, a więc zawartość stabilnego izotopu ^3He np. w wodzie gruntowej. Taka woda może spędzać tysiące lat będąc całkowicie odizolowana od atmosfery. Dzięki znanemu czasowi prób z bronią jądrową, można było użyć zwiększonej koncentracji trytu jako swoistego markera czasu. Badając stosunek koncentracji izotopów ^3H i ^3He można określić „wiek” wody gruntowej, tj. czas, który upłynął od momentu

odizolowania się tej wody od atmosfery. Tego rodzaju badania są użyteczne dla oceniania wielkości zasobów wodnych. Jako przykład może posłużyć zbadanie „wieku” wody gruntowej w jednej z oaz w Omanie, gdzie stwierdzono, że „wiek” ten wynosi 5-6 lat. Ponieważ mamy do czynienia z pustynią, oznacza to, że właśnie taki czas jest potrzebny na przesączenie się wody z powierzchni pustyni na głębokość 1000 m. Oznacza to dalej, że opady deszczowe raz na 5 lat wystarczą dla zapewnienia życia w oazie.



Rys.18.22 Aktywność cezu-137 w winie Bordeaux w funkcji lat

Jak bardzo historia odbija się w zamkniętych zbiornikach widać na dosyć zabawnym przykładzie pomiaru koncentracji ¹³⁷Cs w winie Bordeaux¹², patrz rys. 18.22. W przebiegu aktywności cezu-137 odbija się wyraźnie okres wzmożonych prób jądrowych (lata 1955-1965), jak i awaria reaktora w Czarnobylu (1986 r.). Pokazany przebieg aktywności może stanowić teraz znakomity zegar dla datowania roczników wina Bordeaux. Zmierzone nadzwyczaj słabe aktywności, zawsze mniejsze od ok. 1 Bq/l, wymagają prowadzenia bardzo dokładnych pomiarów. Nie powinny one w żaden sposób odstraszać amatorów wina od picia, gdyż tak niewielkie koncentracje nie są w najmniejszym stopniu szkodliwe dla zdrowia.

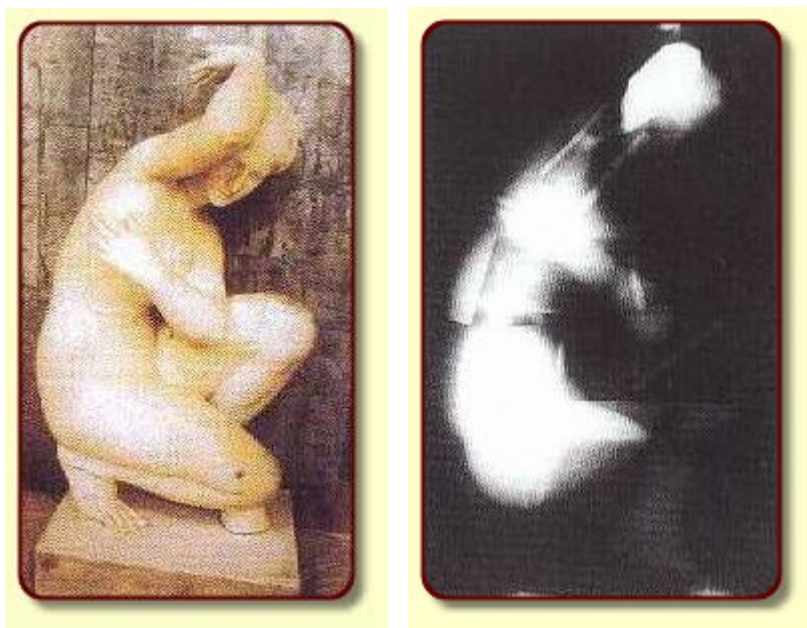
Zastosowanie metod jądrowych w historii sztuki, to nie tylko datowanie. Bardzo często jesteśmy zainteresowani podglądaniem warsztatu danego twórcy, a więc zarówno stosowanych farb, jak i pracy nad ostateczną formą dzieła. Nie mniej istotną sprawą jest

¹² F.Hubert, Ph.Hubert, Nuclear Physics News 13 (2003), No.1, 34

stwierdzenie, w jaki sposób powinniśmy konserwować dane dzieło sztuki. We wszystkich tych wypadkach metody jądrowe okazują się bardzo użyteczne. Metody te dzielimy¹³ na trzy rodzaje:

- radiografię,
- techniki analityczne,
- oraz analizę izotopową zawartości nuklidów stabilnych.

Jak sama nazwa wskazuje, w technice *radiografii* bada się obraz wiązki promieniowania rentgenowskiego, beta, gamma lub neutronów po przejściu przez badany obiekt. Z jednej strony możemy, dzięki kontrastowi optycznemu, zobaczyć szczegóły obrazu nie widoczne gołym okiem, z drugiej zaś – dzięki możliwości wzbudzenia fluorescencji, zobaczenia rozkładu pierwiastkowego w obiekcie. Takim obiektem może być obraz, skorupa, obiekty drewniane – w zależności od rodzaju materiału któreś z rodzajów promieniowania będzie miało przewagę nad innymi. W typowej rentgenografii obrazu możemy zauważyć zmiany w kompozycji dzieła, a także rozróżnić stare i nowsze warstwy farby. Rozwinięcie się techniki tomografii komputerowej w medycynie zaowocowało rozwinięciem się tej techniki także w historii sztuki, gdyż pozawala ona na badanie poprzecznych przekrojów badanych obiektów sztuki. Taka technika jest szczególnie przydatna przy badaniu np. wnętrza rzeźb. W wypadku obiektów dużych, promieniowanie rentgenowskie jest nazbyt silnie pochłaniane, aby mogło być użyteczne i z tego względu stosuje się tu raczej wysokoenergetyczne promieniowanie gamma np. ze źródła ^{137}Cs (661 keV) czy ^{60}Co (energii 1,173 i 1,333 MeV). Jako przykład pokazujemy na rys. 18.23 prześwietlenie rzeźby Afrodyty w celu uzyskania informacji o strukturze marmuru użytego w rzeźbie.



Rys. 18.23 Radiografia gamma rzeźby Afrodyty w Luwrze w celu uzyskania informacji o strukturze marmuru

Nieco wcześniej podawaliśmy przykład *autoradiografii neutronowej*, rys. 18.12. Jej istota polega na powstawaniu pod wpływem neutronów izotopów emitujących promieniowanie

¹³ wg E.Pańczyk, *Zastosowanie Technik Jądrowych w Konserwacji i Identyfikacji Dzieł Sztuki*, w „Promieniowanie jako źródło informacji o właściwościach materii”, Polskie Towarzystwo Nukleonicy, Warszawa (2001), str. 107-119

gamma i/lub beta, które mogą zaświecić klisze rentgenowską. Niezależnie można badać oczywiście widmo energetyczne wzbudzanego promieniowania, pozwalającego na analizę pierwiastkową np. pigmentu użytego w farbach czy spoiwach malarskich¹⁴. Ponieważ oddziaływanie neutronów i promieniowania rentgenowskiego z pierwiastkami jest inne, pokazany na rys. 18.13 autoradiogram ujawniający pierwotny zamysł Tintoretta jest różny od rentgenogramu tego samego obrazu, na którym widać portret innego mężczyzny niż admirała uwidocznionego w powłoce zewnętrznej obrazu.

Jak wspomnieliśmy, dzięki wzbudzeniu fluorescencji przy naświetlaniu neutronami, możemy wykonać analizę pierwiastkową obiektu. Innymi słowy, wykorzystujemy tu neutronową analizę aktywną, która pozwala na jednoczesne zidentyfikowanie kilkudziesięciu pierwiastków w bardzo niewielkiej ilości materiału, rzędu 0,5 mg! Metoda ta stosowana jest w badaniu pigmentów, ceramik, stopów miedzi, kamieni takich, jak marmur, alabaster czy piaskowiec. W tego typu analizach można także wykorzystywać fakt, że różne zaaktywowane izotopy promieniotwórcze mają różne okresy połowicznego zaniku. Pozwala to nastawić się na obserwację konkretnego izotopu pierwiastka, który powinien występować np. w określonym pigmentcie. W Instytucie Chemii i Techniki Jądrowej w Warszawie prowadzi się tą techniką prace nad malarstwem tablicowym i znaleziskami archeologicznymi. W badaniach tych szczególną uwagę poświęca się oznaczaniu pierwiastków śladowych w bieli ołowiowej i zaprawach kredowych. Rozkład ten bowiem jest charakterystyczny dla danej szkoły malarskiej, korzystającej z konkretnych źródeł zaopatrzenia w pigmenty. W podobny sposób można starać się ustalić miejsce pochodzenia kamienia, z którego wykonano daną rzeźbę.

Materiały pochodzące z różnych źródeł, o różnej przeszłości geologicznej, charakteryzują się też różnymi stosunkami zawartości nuklidów stabilnych, jako że stosunki te kształtują się w chwili tworzenia danego złoża. Stosunki izotopowe ołowiu w monetach, brązach i szklach, a także niektórych pigmentach, stosunki izotopowe tlenu i strontu w marmurach, siarki w ultramarynie naturalnej, to tylko przykłady zastosowań analizy stosunków izotopowych izotopów stabilnych. Analiza ta pozwala historykom sztuki na stwierdzenie autentyczności obiektu, a archeologom dowiedzieć się o szlakach handlowych pomiędzy starodawnymi krajami.

Na końcu warto wspomnieć też o *radiacyjnej dezynfekcji*, tj. wykorzystaniu promieniowania jonizującego do zniszczenia flory bakteryjnej, pleśni, grzybów i owadów uszkadzających powierzchnie obiektów o wartości historycznej. Wykorzystuje się w tym celu zarówno źródła promieniowania gamma (cezowe lub kobaltowe), jak i wiązki elektronów z akceleratorów elektronów. W Polsce ta technika jest głównie rozwijana w Międzyresortowym Instytucie Techniki Radiacyjnej Politechniki Łódzkiej oraz w Instytucie Chemii i Techniki Jądrowej w Warszawie. Przy pomocy promieniowania można też zestalić płynne monomery i żywice syntetyczne. Wprowadzając płynną masę w pory materiału, a następnie przekształcając ją w ciało stałe, możemy dokonać zespolenia (*konsolidacji radiacyjnej*) drewna, kamienia, betonu, wyrobów ceramicznych itp.

Jako przykład pierwszej metody może posłużyć przypadek konserwacji mumii Ramzesa II, rys. 18.24, która została zainfekowana przez szybko rozmnażający się grzyb, zagrażający konserwacji mumii. W tej sytuacji zdecydowano o przesłaniu mumii z Kairu do Paryża, gdzie mumię naświetlono promieniowaniem γ .

¹⁴ ibid



Rys. 18.24 Mumia Ramzesa II

18.6 Przykłady przemysłów i narażenia na promieniowanie jonizujące pochodzące z naturalnych źródeł¹⁵

Kończąc przegląd technik, w których energia jądrowa wykorzystywana jest w inny sposób lub do innych celów niż dotychczas omawiane, chcielibyśmy w niniejszym paragrafie dać przegląd przemysłów, w których wykorzystywane są naturalne źródła promieniotwórcze oraz podać typowe narażenie personelu na promieniowanie jonizujące na stanowiskach pracy. Dziś izotopy promieniotwórcze znajdują różnorakie zastosowania. Część omówiliśmy już wcześniej. Podsumujmy jednak:

- w badaniu złóż i wydobyciu ropy przy pomocy izotopów określa się skład gleby, mierzy poziom ropy, sprawdza szczelność zbiorników i migrację ropy, bada zawartość węgla i popiołu, wreszcie – sprawdza się słuszność modeli matematycznych związanych z badaniem złóż;
- w przemyśle chemicznym korzysta się z izotopów promieniotwórczych do pomiaru szybkości przepływu cieczy, sprawdzania wycieków, postępowania korozji, kontroluje się przebiegi procesów chemicznych;
- w przemyśle budowlanym mierzy się skład betonu i cementu, a także tempo przepływu cementu;
- w przemyśle metalowym mamy do czynienia z defektoskopią spawów i badaniami wewnętrznej struktury metalu, bada się ścieranie, a także przepływ metali płynnych;
- w przemyśle papierniczym bada się grubość papieru, o czym już mówiliśmy, ale także kontroluje się właściwą preparatykę papieru;
- w badaniach materiałowych korzysta się z izotopów do badania składu i struktury materiału, polimeryzacji i pomiarów grubości powłok
- w rolnictwie promieniowanie użytych izotopów służy do pozbywania się insektów czy utrwalania żywności
- w przemyśle kosmetycznym promieniowanie służy do higienizacji kosmetyków

¹⁵ wg. biuletynu: „Bezpieczeństwo jądrowe i ochrona radiologiczna” tom 37, nr 1, rok 1999, str. 17 i 18. Szczegółowe przepisy dotyczące narażenia zawodowego - patrz <http://www.paa.gov.pl>

- w przemyśle na usługach medycyny promieniowanie (np. z ^{60}Co) służy do sterylizacji sprzętu medycznego
- w badaniach środowiskowych izotopy promieniotwórcze służą do badania zawartości szkodliwych substancji w atmosferze i w wodach, w uzdatnianiu ścieków i odpadów przemysłowych.

Tab. 18.1 Przemysł wykorzystujący źródła promieniotwórcze a narażenie radiacyjne

Lp	Działalność, przemysł, wyrób	Typowe stężenia radionuklidów	Narażenie zawodowe > 1mSv	Narażenie osób postronnych
1.	Fosforany: produkcja nawozów	do kilku kBq/kg (U, Ra)	możliwe	możliwe
2.	Kwas ortofosforowy: Detergenty, żywność	do 100 kBq/kg (Ra)	możliwe	możliwe
3.	Produkcja kwasu siarkowego	żużel z perytów > 1 kBq/kg		
4.	Odwadnianie kopalń węgla	szlamy do 100 kBq/kg	możliwe	(składowanie !)
5.	Węgiel i popiół lotny	do 10 kBq/kg		możliwe
6.	Wytop metali: cyny Sn, ołowiu Pb, bizmutu Bi, tytanu Ti, aluminium Al	do 100 kBq/kg	możliwe	możliwe
7.	Stopy magnezu / toru	zawartość Th do 4%	możliwe	możliwe, (składowanie !)
8.	Ziemie rzadkie: metalurgia, przerób	rudy mogą zawierać do 10 kBq/kg U oraz do 1000 kBq/kg Th	możliwe	możliwe
9.	Piaski w odlewniach	piaski cyrkonowe do 5 kBq/kg piaski monazytowe do 1000 kBq/kg	możliwe	
10.	Materiały ogniotrwałe, ściernie i ceramiczne	jeżeli z cyrkonem, to mogą występować aktywności do 5 kBq/kg U i do 1 kBq/kg Th.	możliwe	możliwe
11.	Przemysł naftowy i gazowy	1 ÷ 100 kBq/kg Ra, możliwy Th i pochodne	możliwe	prawdopodobne
12.	Przemysł pigmentu TiO_2	surowiec: do 10 kBq/kg (U,Th), ścieki: do 5 kBq/kg	możliwe	możliwe
13.	Pręty do spawania: osłony gazowe z Th	pręty do spawania – do 500 kBq/kg (osłony zawierają do 95% tlenków toru)	możliwe	możliwe

We wszystkich tych wypadkach mamy do czynienia z narażeniem personelu obsługi w stopniu przedstawionym w Tabeli 18.1. Rozdział ten kończymy przeglądem typowych zastosowań niektórych izotopów promieniotwórczych.

18.7 Typowe zastosowania niektórych izotopów promieniotwórczych

Ameryk-241 (^{241}Am) – czujniki dymu, pomiary zawartości toksycznego ołowiu w suchych farbach, zapewnienie jednorodnej gęstości materiału produkowanego taśmowo, jak np. papieru

Wapń-47 (^{47}Ca) – biomedyczne badania funkcjonowania komórek i rozwoju kości u ssaków

Kaliforn-252 (^{252}Cf) – wykrywanie materiałów wybuchowych w bagażu pasażerów linii lotniczych, pomiary wilgotności materiałów przechowywanych w silosach i gleb używanych w konstrukcji dróg oraz wilgotności materiałów używanych w konstrukcjach budowlanych

Węgiel-14 (^{14}C) – datowanie znalezisk, badania nowych lekarstw celem sprawdzenia braku ich szkodliwości

Cez-137 (^{137}Cs) – terapia nowotworów, pomiary dawkowania promieniotwórczych radiofarmaceutyków, pomiary przepływów cieczy w rurociągach, zapewnienie odpowiedniego wypełnienia opakowań żywności i innych produktów (zbadane produkty nie stają się, oczywiście, promieniotwórcze)

Chrom-51 (^{51}Cr) – badania przeżywalności czerwonych ciałek krwi

Kobalt-57 (^{57}Co) – medycyna nuklearna, badania podstawowe w fizyce ciała stałego

Kobalt-60 (^{60}Co) – sterylizacja narzędzi chirurgicznych, konserwacja żywności (drób, owoce, przyprawy)

Jod-123 (^{123}I) – diagnostyka tarczycy

Iryd-192 (^{192}Ir) – testowanie jakości spawów w rurociągach, bojlerach i częściach samolotów

Nikiel-63 (^{63}Ni) – detekcja materiałów wybuchowych, regulatory napięcia w układach elektronicznych

Fosfor-32 (^{32}P) – badania z zakresu biologii molekularnej

Pluton (^{238}Pu , ^{239}Pu) – paliwo jądrowe, baterie do napędów statków kosmicznych

Polon-210 (^{210}Po) – redukcja ładunku elektrostatycznego w produkcji błon fotograficznych i płyt gramofonowych

Sód-24 (^{24}Na) – detekcja miejsc wycieku w przemysłowych rurociągach

Technet-99 (^{99m}Tc) – izotop najbardziej wykorzystywany w medycynie nuklearnej do diagnostyki organów wewnętrznych (litera ‘m’ oznacza stan metastabilny izotopu o długim okresie połowicznego zaniku)

Tor-229 (^{229}Th) – podtrzymywanie czasu świecenia fluorescencyjnego; tor, jako pierwiastek, używany jest także jako dodatek do wolframu w elektrodach spawalniczych. Daje on większą stabilność iskry i mniejsze zanieczyszczenia spawu

Tryt (^3H) – badania metabolizmu nowych leków, farby świecące

Uran (^{235}U) – paliwo jądrowe, dodatek do szkła fluoryzującego

Ksenon-133 (^{133}Xe) – badania wentylacji płuc i przepływu krwi w medycynie nuklearnej