

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

Wydział Fizyki



**METODY I TECHNIKI JĄDROWE W ŚRODOWISKU,
PRZEMYSŁE I MEDYCYNIE**

Ochrona radiologiczna w radiodiagnostyce i radioterapii

Magdalena Kowalska

.....
ocena pracy

.....
data i podpis

Warszawa, styczeń 2012

Spis treści:

1. Wielkości i jednostki dozymetryczne.....	2
1.1. Podstawowe definicje i zależności między wielkościami stosowanymi w pracy... 2	
1.2. Dawka równoważna i dawka efektywna.....	4
2. Skutki napromienienia.....	7
3. Limity dawek.....	9
4. Ochrona radiologiczna w radiodiagnostyce i radioterapii.....	10
4.1. Środki ochrony radiologicznej.....	10
4.2. Wymagania Ochrony Radiologicznej stawiane Zakładom Medycyny Nuklearnej, PET oraz Zakładom Radioterapii.....	12
5. Osłony i zabezpieczenia radiologiczne w pomieszczeniu z akceleratorem liniowym.....	17
5.1. Dodatkowe zabezpieczenia oraz środki ochrony radiologicznej w pomieszczeniu z akceleratorem liniowym.....	20
5.1.1. Drzwi do bunkra.....	20
5.1.2. Wentylacja.....	21
5.1.3. System zabezpieczeń i sygnalizacji.....	21
6. Osłony i zabezpieczenia radiologiczne w radiodiagnostyce.....	23
6.1. Pacjent jako źródło promieniowania.....	23
6.2. Inne źródła narażenia.....	23
6.3. Izotopy stosowane w badaniach diagnostycznych.....	23
6.4. Procedura przygotowania dawek.....	25
6.5. Zabezpieczenia i osłony stosowane na „ścieżce pacjenta”	27
7. Literatura.....	29

1. Wielkości i jednostki dozymetryczne

Aby płynnie poruszać się po temacie ochrony radiologicznej, należy na początku wprowadzić szereg pojęć podstawowych dozymetrycznych.

1.1. Podstawowe definicje i zależności między wielkościami stosowanymi w pracy

Podstawowymi wielkościami stosowanymi przy ocenie narażenia na promieniowanie są aktywność radioizotopu, dawka pochłonięta i dawka efektywna.

Aktywność – to ilość przemian jądrowych w jednostce czasu.

$$A = -\frac{dN}{dt} \quad (1.1)$$

Gdzie:

N – liczba jąder promieniotwórczych w danej chwili czasu;

dt – przedział czasu, w którym liczba jąder zmieniła się o *dN*;

Jednostką aktywności w układzie SI jest bekerel [Bq]

$$1Bq = 1\left[\frac{1}{s}\right]$$

Co oznacza, że 1 bekerel odpowiada 1 przemianie na 1 sekundę. Jednostką spoza układu jest kiur [Ci], który definiuje aktywność jednego grama radu. Warto znać tę jednostkę, gdyż pomimo że obecnie zalecane jest wyrażanie aktywności w bekerelach, to niejednokrotnie można spotkać się z podawaniem aktywności starym sposobem – czyli „zwyczajowo” w kiurach.

$$1\text{Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq} = 37\text{GBq}$$

Prawdopodobieństwo zajścia określonej przemiany w określonej jednostce czasu dla danego izotopu jest wartością stałą λ . Zatem liczbę rozpadów w czasie możemy obliczyć ze wzoru:

$$dN = -\lambda N dt \quad (1.2)$$

Gdzie:

N - liczba jąder w preparacie, które jeszcze w chwili czasu t nie rozpadły się;

Stała λ nazywa się stałą rozpadu promieniotwórczego.

W chwili $t = 0$ liczba jąder równała się N_0 , stąd

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1.3)$$

Wiedząc, że

$$A = -\frac{dN}{dt} \sim N \quad (1.4)$$

Możemy powyższe równanie zapisać w następującej postaci:

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t} \quad (1.5)$$

Powyższe równania prowadzą do wprowadzenia pojęcia czasu połowicznego rozpadu $T_{1/2}$, określającego czas w ciągu którego aktywność spada do połowy swej początkowej wartości (lub też czas, po którym rozpadnie się połowa jąder), to znaczy:

$$\frac{A}{A_0} = \frac{N}{N_0} = \exp(-\lambda T_{1/2}) = \frac{1}{2} \quad (1.6)$$

$$A = A_0 \exp\left(-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t\right) \quad (1.7)$$

Podstawową wielkością stosowaną w dozymetrii jest dawka pochłonięta, czyli stosunek energii promieniowania E przekazanej w pewnej objętości materii do masy materii zawartej w tej objętości.

$$D = \frac{dE}{dm} \quad (1.8)$$

Jednostką dawki pochłoniętej w układzie SI jest 1Gy (grej) = $[\frac{1J}{1kg}]$

Moc dawki – to dawka D pochłonięta w jednostce czasu t

$$D' = \frac{dD}{dt} \quad (1.9)$$

Nienaładowane cząstki np. neutrony nie jonizują bezpośrednio materii. Zderzają się jednak z elektronami i jądrami atomów i wywołują ich odrzut, co prowadzi do powstania cząstek naładowanych i wtórnej jonizacji ośrodka. Wielkość fizyczną uwzględniającą generację cząstek naładowanych przez nienaładowane nazywamy kerma (z ang. *Kinetic Energy Released In unit Mass*) i definiujemy jako:

$$K = \frac{dE}{dm} \quad (1.10)$$

Gdzie:

dE to suma początkowych energii kinetycznych wszystkich naładowanych cząstek jonizujących uwolnionych przez nienaładowane cząstki w materiale o masie dm.

Jednostką kermy jest Gy (grej).

1.2. Dawka równoważna i dawka efektywna

Ciało ludzkie jest zbudowane z czterech rodzajów tkanek: tkanki nabłonkowej, łącznej, mięśniowej oraz nerwowej, które dodatkowo różnicują się i grupują do wypełniania ściśle określonych fizjologicznych funkcji. Każdy narząd w inny sposób „reaguje” na dostarczoną mu dawkę promieniowania. Powstałe skutki biologiczne napromienienia nie są determinowane tylko i wyłącznie przez wielkość dawki pochłoniętej, ale również przez rodzaj promieniowania pochłoniętego. Dlatego wprowadza się pojęcie dawki równoważnej w tkance

lub narządzie H_T , przy którym uwzględnia się rodzaj promieniowania poprzez odpowiednie współczynniki wagowe w_R .

$$H_T = \sum_R w_R D_{TR} \quad (1.11)$$

Gdzie:

$D_{T,R}$ oznacza dawkę promieniowania typu R pochłoniętą przez tkankę T ;

Wartość współczynnika w_R dla promieniowania gamma wynosi 1. Dawkę równoważną wyrażamy w Sv (siwertach).

W ocenie skutków należy również uwzględnić różnice wrażliwości poszczególnych organów. Służy do tego wielkość zwana dawką efektywną, która uwzględnia współczynniki wagowe różnych narządów i tkanek.

$$E = \sum_T w_T H_T \quad (1.12)$$

Tabela 1.1. Współczynników wagowych narządów i tkanek w_T , [Hry01]

Narząd/tkanka	w_T
Gruczoły płciowe	0,20
Czerwony szpik kostny	0,12
Jelito Grube	0,12
Płuca	0,12
Żołądek	0,12
Pęcherz moczowy	0,05
Gruczoły sutkowe	0,05
Wątroba	0,05
Przełyk	0,05
Tarczycza	0,05
Skóra	0,01
Powierzchnia kości	0,01
Pozostałe	0,05

W przypadku skażeń wewnętrznych do dawki efektywnej od promieniowania zewnętrznego dodaje się efektywną dawkę obciążającą $E(\tau)$ pochodzącą od wniknięcia radionuklidów.

$$E(\tau) = \sum w_T H_T(\tau) \quad (1.13)$$

Analogicznie jak w przypadku promieniowania zewnętrznego jest to suma iloczynów obciążających dawek równoważnych $H_T(\tau)$ i odpowiednich czynników wagowych tkanki w_T , z tym, że obciążająca dawka równoważna jest równa całe w czasie z mocy dawki równoważnej w tkance lub narządzie T , którą otrzymuje dana osoba w wyniku wniknięcia do organizmu nuklidu promieniotwórczego.

$$H_T(\tau) = \int_0^{\tau} H_T dt \quad (1.14)$$

Jeżeli czas τ nie jest podany, zakładamy, że dla dorosłej osoby wynosi on 50 lat, zaś dla dziecka 70 lat. Efektywna dawka obciążająca zależy od przebiegu wchłaniania substancji radioaktywnych oraz od stałej rozpadu danego izotopu oraz szybkości jego wydalania z organizmu.

Ponieważ zmierzenie dawki pochłoniętej w poszczególnych tkankach i narządach nie jest możliwe, w dozymetrii do oceny indywidualnego narażenia od promieniowania zewnętrznego stosuje się przybliżenie dawki efektywnej zwane indywidualnym równoważnikiem dawki $H_p(d)$, gdzie d jest głębokością w tkance (w mm). Najczęściej stosowane dozymetry służą do pomiaru $H_p(10)$ - czyli indywidualnego równoważnika dawki na głębokości 10 mm. Wartość d została tak dobrana, ponieważ pomiar na tej głębokości najlepiej odzwierciedla wartość dawki efektywnej (jest jej górną obwiednią). W kontroli indywidualnej używane są także dozymetry $H_p(0.07)$ – służące do oceny dawek pochodzących od promieniowania słabo przenikliwego (są to wtedy dawki na skórę lub soczewkę oka).

Wielkością roboczą służącą do monitorowania środowiska pracy (dla promieniowania przenikliwego) jest przestrzenny równoważnik dawki, $H^*(10)$, zdefiniowany jako taki równoważnik dawki, który byłby wytworzony przez odpowiednie pole rozciągnięte i zorientowane w kuli ICRU na głębokości 10 mm wzdłuż promienia ustawionego w kierunku przeciwnym do kierunku pola. Wspomniana w definicji kula ICRU to kula o średnicy 30 cm i gęstości 1 g cm^{-3} , wykonana z materiału równoważnego tkance.

2. Skutki napromienienia

Skutki oddziaływania promieniowania jonizującego na organizm żywy mogą być dwójakiego rodzaju: deterministyczne i stochastyczne. Skutki deterministyczne (np. poparzenia popromienne, zmiany martwicze, zaćma, bezpłodność, śmierć) to takie, przy których możemy jednoznacznie stwierdzić, że zostały spowodowane nadmierną ekspozycją na promieniowanie w wyniku czego doszło do śmierci tak wielu komórek, że organizm, pomimo wzmożonej proliferacji, nie jest w stanie zrekompensować strat. Skutki te występują przy przekroczeniu dawki progowej. Poniżej tego progu fakt zniszczenia pewnej liczby komórek nie wpływa na funkcjonowanie organizmu. Dawki progowe zostały podane w tabeli poniżej:

Tabela 2.1. Dawki progowe, [Hry01]

Tkanka i następstwo	Dawka progowa [Sv]
Jądra niepłodność czasowa niepłodność trwała	0,15 3,5-6,0
Jajniki Niepłodność	2,5-6,0
Soczewka oka wykrywalne zmętnienie upośledzenie widzenia (zaćma)	0,5-2,0 5,0
Szpik kostny upośledzenie hematopoezy	5,0
Skóra rumień, suche złuszczenie naskórka, sączące złuszczenie naskórka martwica naskórka i skóry właściwej	3,0-5,0 20 50
Całe ciało Ostra choroba popromienna – zgon	1,0

Przy normalnej pracy z promieniowaniem skutki deterministyczne nie występują.

Drugi typ skutków to skutki stochastyczne zwane też czasami probabilistycznymi, do których wliczają się nieodwracalne uszkodzenia takie jak mutacje genowe prowadzące do chorób nowotworowych lub patologii dziedzicznych. Niestety nie ma przekonywujących dowodów na zależność pomiędzy ekspozycją na promieniowanie jonizujące i skutkami stochastycznymi, jedynie obserwuje się, że częstość ich występowania wzrasta wraz z pochłoniętą dawką. Nie jesteśmy zatem w stanie określić dawki progowej dla ich występowania.

Dla małych dawek przyjęto liniową zależność pomiędzy dawką a skutkami stochastycznymi, jednakże niedawno wysnuto hipotezę, że małe dawki wpływają pozytywnie na kondycję organizmu. Prowadzi to do wielu burzliwych dyskusji w środowisku naukowym, na temat tego, czy obecne dawki graniczne są dobrze ocenione i czy nie należy zmienić wymagań w stosunku do ochrony radiologicznej.

3. Limity dawek

W Polsce wartości dawek granicznych reguluje Rozporządzenia Rady Ministrów z dnia 18 stycznia 2005r. w sprawie dawek granicznych promieniowania jonizującego. (Dz.U.2005.20.168). Są one różne dla ogółu populacji i dla pracowników, których specyfika pracy wymaga kontaktu z promieniowaniem.

Limity dawek (roczne) zalecane przez Międzynarodową Komisję Ochrony Radiologicznej (ICRP) i wymagane przez polskie przepisy przedstawiają się następująco:

Tabela 3.1.Roczne limity dawek, [Hry01]

	dla pracowników [mSv]	dla ogółu ludności [mSv]
Dawka efektywna:	20	1
Dawki równoważne:		
w soczewkach oczu	150	15
w skórze	500	50
w rękach i stopach	500	50

Osobne wartości dawek równoważnych dla soczewek oczu, skóry oraz rąk i stóp wynikają z tego, że w przypadku tych narządów zagrożenie efektami deterministycznymi (uszkodzenie) występuje przy niższych dawkach niż zagrożenie indukacją nowotworu, wyrażone przez czynnik wagowy w_T .

4. Ochrona radiologiczna w radiodiagnostyce i radioterapii

Ochronę radiologiczną definiuje się jako zespół przedsięwzięć organizacyjnych oraz rozwiązań technicznych, mający na celu zminimalizowanie zagrożeń związanych z oddziaływaniem promieniowania jonizującego na organizm człowieka. Pojęcie ochrona radiologiczna zazwyczaj odnosi się głównie do personelu medycznego, czyli osób zatrudnionych w warunkach narażenia na promieniowanie. Rzadko kiedy rozważa się kwestie ochrony radiologicznej pacjentów, które stanowią osobne zagadnienie.

4.1. Środki ochrony radiologicznej

1. Zasada ALARA.

Podstawową zasadą ochrony radiologicznej jest tak zwana zasada ALARA – *as low as reasonable achievable*. Mówi ona o konieczności rozsądnego ograniczenia narażenia na promieniowanie jonizujące, tak aby dawki były możliwie niskie, ale jednocześnie aby nie następowało niepotrzebne ograniczenie możliwości korzystania z promieniowania i uzyskiwania związanych z tym korzyści.

2. Zachowanie odpowiedniej odległości.

„Odwrotna proporcjonalność mocy dawki do r^2 sugeruje, że podstawową zasadą ochrony przed promieniowaniem jest przebywanie w możliwie dużej odległości od jego źródła.” [Hry01] Dotyczy to zwłaszcza promieniowania γ , które jest najbardziej przenikliwe. Jeśli chodzi o promieniowanie α czy β , odległość jest również istotna, należy jednak pamiętać że korpuskularna natura α oraz β determinuje jego niewielki zasięg, co oznacza że zwiększanie dystansu powyżej określonej odległości nie ma sensu.

3. Ograniczenie czasu.

Zaleca się ograniczanie czasu ekspozycji na promieniowanie jonizujące, zarówno wobec osób pracujących przy źródłach promieniowania jak i osób z populacji. W przypadku zawodowego kontaktu ze źródłem o dużej aktywności zalecane jest przeprowadzenie ćwiczeń symulacyjnych w sytuacjach zagrożenia, w celu sprawniejszego postępowania awaryjnego.

4. Monitoring dawek

Procedury kontroli dawek indywidualnych są przestrzegane w sposób wysoce restrykcyjny (za niedopatrzania grożą bardzo duże kary oraz konsekwencje). Obejmuje one wszystkich pracowników narażonych na promieniowanie na terenie kontrolowanym. Obowiązki pracodawcy oraz pracownika w zakresie kontroli określa Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 27 kwietnia 2004 r. w sprawie ochrony przed promieniowaniem jonizującym pracowników zewnętrznych narażonych podczas pracy na terenie kontrolowanym. Pracownicy kategorii A podlegają kontroli na podstawie pomiarów dawek indywidualnych, pracownicy kategorii B zaś na podstawie pomiarów indywidualnych lub dawek środowiskowych. Kontrola dawek prowadzona jest za pomocą dozymetrów filmowych, dozymetrów termoluminescencyjnych oraz coraz częściej za pomocą elektronicznych urządzeń takimi jak DosiCard.

Dawkomierze indywidualne powinny być noszone z przodu górnej części tułowia, na klatce piersiowej, gdyż przyjmuje się, że całe ciało jest równomiernie napromieniane. W niektórych sytuacjach jednak (np. podczas przygotowywania preparatów w medycynie nuklearnej) istnieje możliwość znacznego narażenia rąk. Powinno się wtedy zakładać specjalne dawkomierze pierścinkowe umożliwiające lokalną ocenę otrzymanej dawki.

Wymiana dozymetrów i sporządzenie raportów dotyczących otrzymanych dawek przez personel odbywa się raz na kwartał. Ponieważ ocena dawki jest istotną częścią programu ochrony przed promieniowaniem, ważne jest, aby pracownicy wywiązywali się ze swoich obowiązków tzn. nosili dozymetry cały czas przy sobie oraz zdawali je na czas do odczytu.

5. Zastosowanie odpowiednich osłon i zabezpieczeń.

Stosowanie osłon i zabezpieczeń ma za zadanie zmniejszenie dawki w danym punkcie przestrzeni. Ze względu na zastosowanie osłony dzielimy na:

- a) Osłony stałe: przegrody (np. ściany) stojące na drodze źródło – stanowisko pracy oraz drzwi, które pomimo tego, że są ruchome, pozostają zamknięte i pełnią funkcję przegrody podczas pracy za źródłem
- b) Osłony ruchome: osłony, które można dowolnie przemieszczać np. podwieszane, na kółkach oraz osłony na radiofarmaceutyki
- c) Osłony osobiste: wszelkiego rodzaju zabezpieczenia dodatkowe przy pracy z konkretnym źródłem, których rozmiar i charakter jest dobierany specjalnie do pracownika i czynności, którą wykonuje (rękawice z gumy ołowiowej, okulary ze szkła ołowiowego, fartuchy itp.)
- d) Pojemniki: do przechowywania lub transportu źródeł

4.2. Wymagania Ochrony Radiologicznej stawiane Zakładom Medycyny Nuklearnej, PET oraz Zakładom Radioterapii

Wymagania ochrony radiologicznej odnoszą się głównie do pracowni medycyny nuklearnej oraz PETowskich, gdzie spotkać się można z otwartymi i zamkniętymi, niejednokrotnie przemieszczającymi się źródłami promieniowania. W ośrodkach teleradioterapii wystarczającą ochroną przed promieniowaniem jonizującym są zazwyczaj bunkry, w których umieszczone są akceleratory.

1. Wymogi budowlane i projektowe:

Ogólny układ pomieszczeń w ośrodkach stosujących diagnostykę radioizotopową oraz radioterapię powinien w miarę możliwości uwzględniać oddzielenie obszarów pracy i obszarów przebywania pacjentów. Obszary na których istnieje ryzyko napromienienia powinny być oznaczone specjalnymi znakami (zgodnymi z przepisami krajowymi), ostrzegającymi przed substancjami radioaktywnymi i promieniowaniem jonizującym. Zasady

dotyczące bezpieczeństwa i higieny pracy zawarte są w Rozporządzeniu Rady Ministrów z dnia 12 lipca 2006 r. w sprawie szczegółowych warunków bezpiecznej pracy ze źródłami promieniowania jonizującego (na podstawie art. 45 ustawy z dnia 29 listopada 2000 r. - Prawo atomowe (Dz. U. z 2004 r. Nr 161, poz. 1689). Określone tam zostały: wymagania techniczne i wymagania ochrony radiologicznej dotyczące pracowni stosujących źródła promieniotwórcze, wymagania dotyczące pracy ze źródłami promieniotwórczymi oraz zasady kontroli źródeł promieniowania jonizującego oraz ewidencji źródeł promieniotwórczych.

2. Klasyfikacja obszarów i pracowników:

Osoby pracujące w warunkach narażenia na promieniowanie jonizujące można podzielić na dwie kategorie: „A” i „B” (Prawo Atomowe, art. 17), a miejsca ich pracy dzieli się na tereny kontrolowane i tereny nadzorowane (Prawo Atomowe art. 18). Kategoria A obejmuje pracowników, którzy „mogą być narażeni na dawkę skuteczną przekraczającą 6 mSv (milisiwertów) w ciągu roku lub na dawkę równoważną, przekraczającą trzy dziesiąte wartości dawek granicznych dla soczewek oczu, skóry i kończyn. Kategoria B obejmuje pracowników, którzy „mogą być narażeni na dawkę skuteczną przekraczającą 1 mSv w ciągu roku lub na dawkę równoważną, równą jedną dziesiątą wartości dawek granicznych dla soczewek oczu, skóry i kończyn.” Osobą odpowiedzialną za klasyfikację pracowników są jest kierownik jednostki organizacyjnej. Dokonuje tego w oparciu o przewidywany poziom narażenia.

Podział na tereny kontrolowane i tereny jest regulowany przez wielkość i rodzaj występujących zagrożeń. Tereny kontrolowane to takie, na których „istnieje możliwość otrzymania dawek określonych dla pracowników kategorii A, istnieje możliwość rozprzestrzeniania się skażeń promieniotwórczych lub mogą występować duże zmiany mocy dawki promieniowania jonizującego”. Tereny nadzorowane zaś - na których „istnieje możliwość otrzymania dawek określonych dla pracowników kategorii B i które nie zostały zaliczone do terenów kontrolowanych” Podstawowe wymagania dotyczące terenów kontrolowanych i nadzorowanych zostały określone w rozporządzeniu Rady Ministrów z dnia 20 lutego 2007 r. w sprawie podstawowych wymagań dotyczących terenów kontrolowanych i nadzorowanych (Dz.U. 2007 nr 131 poz. 910).

3. Wyposażenie ochronne personelu:

Kierownik jednostki zobowiązany jest zapewnić odpowiednie środki ochrony indywidualnej (m.in. fartuchy, rękawice, buty, osłony na tarczycę, gogle). Każda osoba mająca kontakt ze źródłem promieniowania powinna nosić środki ochrony indywidualnej, aby zminimalizować prawdopodobieństwo skażenia swojego ciała. Buty noszone podczas pracy z radionuklidami powinny być zabudowane, aby zminimalizować potencjalny kontakt skóry z wylanymi szczątkami materiałów promieniotwórczych. Należy stosować kleszcze, szczypce przy kontakcie z substancjami radioaktywnymi w celu zmniejszenia narażenia na promieniowanie, poprzez zwiększenie odległości między źródłem i rękami. Przy pracy z beta-emiterami wysokich energii zalecane jest noszenie okularów ochronnych, aby zmniejszyć napromienienie oczu i zminimalizować ryzyko dostania się substancji radioaktywnej do oka. W celu ochrony skóry należy używać rękawiczek jednorazowych.

Z punktu widzenia bezpieczeństwa skuteczniejsze jest osłonięcie samego źródła promieniowania niż poszczególnych osób. Wybór materiału i grubość osłony zależy od rodzaju i aktywności stosowanych w danym ośrodku radionuklidów. Do budowy osłon najczęściej używany jest ołów. Przy beta-emiterach wysokich energii, takich jak ^{32}P wymagane są dodatkowej warstwy z materiałów o małej liczbie atomowej Z , takich jak akryl (np. plexi), aby zapobiegać powstawaniu promieniowania hamowania. Do takich zabezpieczeń zaliczamy: osłony przy stanowiskach pracy, osłony na strzykawki, osłony na fiolki z radionuklidami, zabezpieczone pojemniki na odpady promieniotwórcze, osłony ruchome na oddziałach terapii, itp.

4. Osłony

Osłony można podzielić ze względu na rodzaj promieniowania, który ma osłabiać.

a) Promieniowanie α

Zważywszy na bardzo krótki zasięg tego promieniowania w powietrzu (rzędu cm), promieniowanie α nie wymaga stosowania dodatkowych osłon. Do ochrony wystarczy zachowanie odpowiedniej odległości od źródła np. poprzez wykorzystanie szczypców czy też rękawiczek podczas pracy ze źródłem.

b) Promieniowanie β

Promieniowanie β charakteryzuje się dużo większym zasięgiem w powietrzu niż promieniowanie α (rzędu metrów). Grubość osłony zależy od maksymalnej energii cząsteczek β , przed jakimi ma chronić personel. Do konstruowania osłon stosuje się materiały lekkie, o niskiej liczbie atomowej takie jak aluminium, szkło oraz tworzywa sztuczne. Zastosowanie materiałów ciężkich, takich jak na przykład ołów grozi ryzykiem emisji promieniowania hamowania (wytworzonego przez zatrzymywanie w materiale elektrony), gdyż prawdopodobieństwo emisji promieniowania hamowania rośnie wraz z kwadratem liczby atomowej użytego materiału.

c) Promieniowanie γ i X

Dla promieniowania elektromagnetycznego, w przeciwieństwie do promieniowania korpuskularnego, nie można określić maksymalnego zasięgu w danym ośrodku. Przyjęło się więc stosować pojęcie krotności, które mówi o tym jaka część promieniowania przechodzącego przez dany ośrodek zostanie w nim pochłonięta. Krotność osłabienia zależy od materiału i grubości ośrodka oraz od energii promieniowania. Zarówno materiały o niskiej jak i wysokiej liczbie atomowej osłabiają promieniowanie elektromagnetyczne – różnią się tylko między wymaganą grubością do zapewnienia odpowiedniej krotności osłabienia promieniowania. Im cięższy materiał, tym mniejsza grubość wymagana do zapewnienia danej krotności osłabienia, ponieważ przekroje czynne zależą od liczby atomowej w potęgze. Na przykład taki sam efekt dla osłabienia wiązki o energii 511 keV zapewnia 1 mm ołowiu, 2,7cm betonu, 3 mm żelaza. Osłony ołowiane nie należą jednak do najtańszych – dlatego bardziej popularniejsze wydają się być osłony betonowe, stanowiące tani i łatwy w stosowaniu budowlany materiał konstrukcyjny. Dodatkową zaletą betonów jest możliwość domieszkowania ich np. odpadami żeliwnymi w celu zwiększenia ich gęstości. Ołów swoje zastosowanie znajduje przy osłonach ruchomych – takich jak m.in. pojemniki do transportu źródeł promieniotwórczych czy też szkła odgradzające konsule techników od aparatów rentgenowskich (tzw. szkło ołowiowe).

Sposób postępowania przy obliczaniu osłon reguluje polska norma PN 86/J-80001. Materiały i sprzęt ochronny przed promieniowaniem X i gamma.



Rys. 4.1. Bloki ołowiowe [www.wikipdia.org]

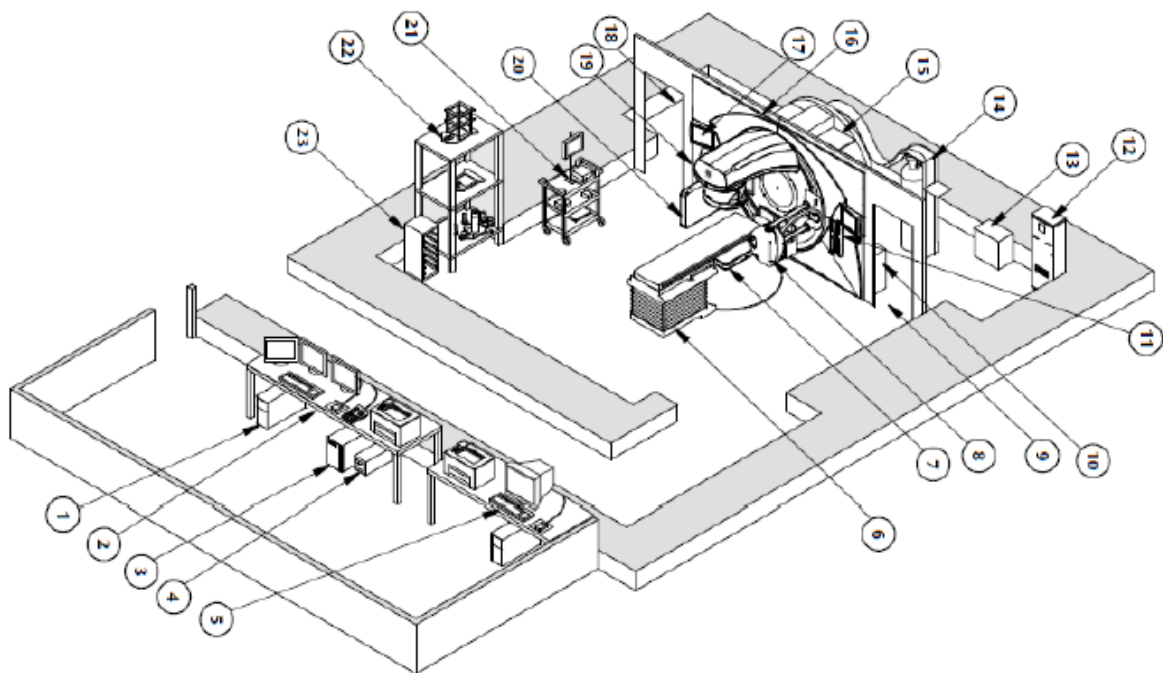
d) Promieniowanie neutronowe

Neutrony, z którymi mamy do czynienia w ośrodkach radioterapeutycznych to najczęściej neutrony prężkie. Aby uchronić się przed działaniem promieniowania neutronowego, należy najpierw padającą wiązkę spowolnić do energii termicznych, a następnie zatrzymać ją umieszczając na ich drodze materiał o dużym przekroju czynnym na ich absorpcję np. kadm lub bor. Należy pamiętać, że taka osłona, po przejściu wiązki neutronów, sama staje się dalszym źródłem promieniowania (wychwyty radiacyjny (n, γ)). Dlatego często stosuje się jeszcze dodatkową warstwę mającą za zadanie absorpcję powstałych kwantów γ .

Bardzo dobrymi moderatorami są materiały o dużej zawartości wodoru jak np. woda lub parafina oraz związki węgla z wodorem jak i zarówno sam węgiel.

5. Osłony i zabezpieczenia radiologiczne w pomieszczeniu z akceleratorem liniowym

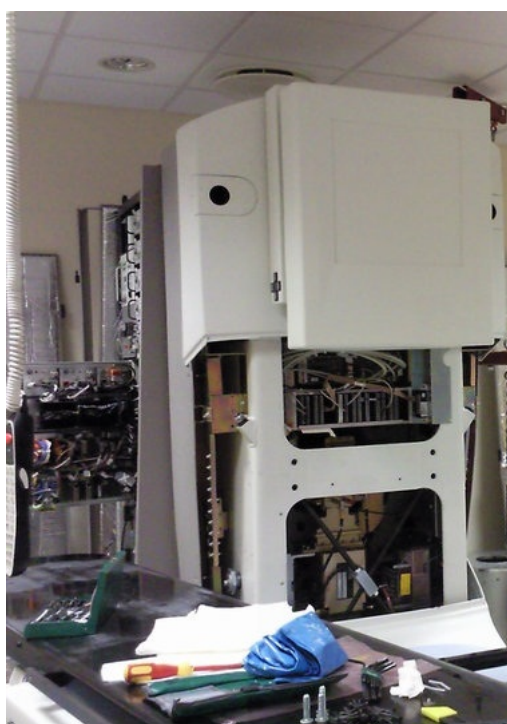
Bunkry, w których stoją przyspieszacze liniowe stosowane do celów terapeutycznych, budowane są zazwyczaj na planie labiryntu. Taka konstrukcja ma na celu zmniejszeniu dawki przy wejściu do pomieszczenia tak, aby drzwi osłonne były możliwie lekkie.



1	Komputer obrazujący w sterowni	13	Generator kV
2	Pulpit sterowniczy	14	Podpora do kabli
3	Szafka sterownicza LCS	15	Bęben gantry
4	UPS – system podtrzymania zasilania	16	Ścianka pomieszczenia technicznego
5	Stacja robocza radioterapii lub stacja przeglądania	17	Monitor parametrów terapii (TRM)
6	Stół Precise	18	Drzwi 2A
7	Ramię systemu obrazowania iViewGT™	19	Ramię głowicy
8	Ramię lampy rtg	20	Ramię toru wizyjnego rtg
9	Drzwi 2B	21	System koordynacji oddechowej ABC
10	Moduł interfejsu dla stołu lub szafki sterowania systemem	22	Aplikator elektronowy na półce
11	Kaseta ręcznego sterowania	23	Stojak na kolimatory kV
12	Szafka interfejsu		

5.1. Przykładowy plan pracowni z przyspieszaczem terapeutycznym [Pro09]

Elementy konstruujące akcelerator wraz z działem elektronowym są odpowiednio osłonięte tak, aby wyeliminować prawdopodobieństwo przecieku promieniowania poniżej ustalonych wartości regulowanych przez obowiązujące międzynarodowe normy IEC.



5.2. Rozebrany z osłon akcelerator liniowy firmy Siemens [źr. własne]

W terapii stosuje się 2 rodzaje promieniowania: elektronowe oraz fotonowe o energiach rzędu MeV. Przy projektowaniu osłon problemu nie stanowi sama pierwotna wiązka (wychodząca z głowicy przyspieszacza), a promieniowanie rozproszone - jednokrotnie i czasem również wielokrotnie. Związane jest ono z rozpraszaniem wiązki pierwotnej w ciele pacjenta oraz w elementach konstrukcyjnych np. takich jak stół, ściany i inne elementy wyposażenia bunkra. Najistotniejszy udział ma jednak emisja neutronów w otoczeniu akceleratora medycznego, wytwarzanych podczas oddziaływania wiązek fotonów o energiach wyższych niż 10MeV z materiałem kolimatora, tarczy, filtrów, przesłon i innych elementów znajdujących się na drodze wiązki.

„W podręczniku Safety Report Series nr.47 [Rad06] podano, powołując się na szereg publikacji w tym zakresie, że dla akceleratorów liniowych o energiach od 10 MeV do 25 MeV średnia energia neutronów bezpośrednio wychodzących z głowicy (przeciek neutronów) zasadniczo nie przekracza wartości 1 MeV, a średnia energia neutronów rozpraszanych przez materiały wewnątrz pomieszczenia terapii jest rzędu 0.24 MeV.” [Pro09]

Aby osłabić natężenie powstałej wiązki do 1/10 wiązki pierwotnej (parametr ten zwany jest grubością dziesiątą i oznaczany TVL) należy użyć 210 mm betonu. Jest to mniej więcej połowa warstwy TVL dla wysokoenergetycznych fotonów (10-25MeV), której wartość wynosi około 400-500mm betonu. Warto zauważyć, że jeśli osłona jest wystarczająca dla pierwotnej wiązki fotonowej, jest również wystarczająca dla wiązki wtórnie wyemitowanych neutronów. Lecz jeśli do budowy osłon przed promieniowaniem gamma, użyto materiałów o dużej liczbie atomowej, w szczególności metali ciężkich, konieczne będzie również użycie moderatora do spowolnienia neutronów prędkich – szczególnie w przypadku drzwi prowadzących do bunkra.

Na wysokość dawki promieniowania w wejściu do labiryntu mają wpływ następujące składowe:

1. Promieniowanie fotonowe, powstające z rozproszenia wiązki pierwotnej, rozproszonej od pacjenta, a następnie od ścian bunkra i labiryntu.

2. Promieniowanie fotonowe powstające z rozproszenia promieniowanie ubocznego głowicy we wszystkich jej położeniach
3. Promieniowanie uboczne głowicy, padające bezpośrednio na drzwi po osłabieniu w ścianie labiryntu
4. Promieniowanie powstające w zjawisku wychwytu gamma
5. Promieniowanie neutronowe.

Przyjmuje się, że średnia energia neutronów przy wejściu do bunkra, którego korytarz jest długi na 5m, wynosi około 100keV. TVL dla tej energii w BPE: polietylenie domieszkowanym borem (bor - aby zatrzymać również neutrony termiczne) wynosi 45mm. Taką warstwę umieszcza się zazwyczaj pomiędzy dwoma warstwami ołowiu bądź też ołowiu i stali. Warstwa od strony wewnętrznej ma za zadanie zmniejszenie energii neutronów w procesie rozpraszanie nieelastycznego i co za tym idzie, zwiększenie skuteczności osłabiania w BPE. Warstwa od strony zewnętrznej jest osłoną dla fotonów generowanych w procesie wychwytu γ zachodzącym w PBE. Jeśli długość labiryntu jest krótsza niż 5 m, należy stosować dodatkowe warstwy ołowiu i PBE.

5.1 Dodatkowe zabezpieczenia oraz środki ochrony radiologicznej w pomieszczeniu z akceleratorem liniowym

5.1.1 Drzwi do bunkra

Oprócz wymogów dotyczących materiału, z którego zbudowane są drzwi oraz jego grubości zaleca się, aby drzwi do pomieszczenia z akceleratorem posiadały napęd elektryczny ze względu na duży ciężar. Dodatkowo powinna istnieć możliwość ręcznego otwarcia drzwi na wypadek wystąpienia awarii napędu. W pobliżu drzwi należy również umieścić przycisk umożliwiający zatrzymanie ruchu drzwi w razie takiej konieczności.

Drzwi powinny być skorelowane z systemem blokady wiązki powodując jej przerwanie w przypadku otwarcia drzwi i nie pozwalając na ponowne rozpoczęcie emisji do czasu ponownego ich zamknięcia.

5.1.2 Wentylacja

Najczęściej producent danego aparatu podaje zalecaną liczbę wymian powietrza. Jeśli jednak tak się nie dzieje, należy stosować się do przepisów lokalnych. Zgodnie z polskimi przepisami powietrze w pracowni akceleratorowej powinno być wymieniane co najmniej 6 razy na godzinę.

5.1.3 System zabezpieczeń i sygnalizacji

Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 12 lipca 2006 r. w sprawie szczegółowych warunków bezpiecznej pracy ze źródłami promieniowania jonizującego (Dz. U. Nr 140, poz. 994) zaleca wprowadzenie następujących zabezpieczeń:

- 1) sygnalizacja świetlna przy wejściu do pracowni ma za zadanie informować o doprowadzeniu zasilania do aparatu
- 2) geometria ustawienia osłon stałych powinna eliminować możliwość padania pierwotnej wiązki promieniowania jonizującego na drzwi wejściowe
- 3) konstrukcja drzwi powinna umożliwiać ich otwarcie zarówno od zewnątrz jak i od wewnątrz pomieszczenia
- 4) pomiędzy sterownią a pomieszczeniem terapeutycznym musi istnieć łączność głosowa i wizualna
- 5) w pracowniach akceleratorowych montuje się system zabezpieczający przed włączeniem zasilania akceleratora wysokim napięciem przy otwartych drzwiach do pomieszczenia oraz

wyłączniki bezpieczeństwa zarówno w pomieszczeniu terapeutycznym jak i w sterowni, umożliwiające przerwanie pracy urządzenia w razie konieczności

Dodatkowo oznakowanie pracowni powinno być zgodne z wymogami rozporządzenia Rady Ministrów z dnia z dnia 12 lipca 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków bezpiecznej pracy ze źródłami promieniowania jonizującego (Dz. U. z 2007r. Nr 140 poz. 994).

6. Osłony i zabezpieczenia radiologiczne w radiodiagnostyce

6.1. Pacjent jako źródło promieniowania

Należy zauważyć, że w badaniach diagnostycznych oraz w brachyterapii, pacjent po podaniu izotopu staje się chodzącym źródłem promieniowania. Izotop podany pacjentowi dożylnie rozprzestrzenia się w jego ciele, ulegając przez cały czas od podania rozpadowi fizycznemu, emitując przy tym promieniowanie jonizujące. Izotopy stosowane przy badaniach PET charakteryzują się wyższą energią promieniowania (511 keV) niż stosowany często w badaniach scyntygraficznych technet (140 keV). Moc dawki w otoczeniu pacjenta jest zatem dużo większa w pierwszym przypadku (w przybliżeniu można przyjąć 30 $\mu\text{Sv/h}$ w odległości 1 m od pacjenta po podaniu radiofarmaceutyku). Jeśli założymy, że pacjent przebywa w stosunkowo dużej odległości od innych osób (izolatka, toaleta, korytarz), możemy aktywność w jego ciele traktować z dobrym przybliżeniem jako źródło punktowe i na tej podstawie zamodelować stworzone przez niego zagrożenie.

6.2. Inne źródła narażenia

Każdy rodzaj pracy przy źródłach radioaktywnych przyczynia się do zewnętrznego narażenia pracownika: rozpakowanie materiałów radioaktywnych, pomiary aktywności, przechowywanie źródeł, przygotowywanie radiofarmaceutyku, podanie preparatu, samo badanie pacjenta, opieka nad nim i w końcu postępowanie z radioaktywnymi odpadami promieniotwórczymi. Najbardziej narażone są osoby bezpośrednio obcujące z pacjentem po wstrzyknięciu izotopu, czyli pielęgniarki oraz technicy.

6.3. Izotopy stosowane w badaniach diagnostycznych

Pacjent skierowany na badanie PET otrzymuje dożylnie tzw. radiofarmaceutyk nazywany też czasem znacznikiem. W skład radiofarmaceutyku wchodzi: promieniotwórczy izotop odpowiedniego pierwiastka sprzężony ze związkiem chemicznym lub cząsteczką (ligandem) mającą na celu dostarczenie radioizotopu do obrazowanego narządu lub tkanki. Ligandy dobiera się w oparciu o znajomość funkcji pełnionych przez daną tkankę.

Radiofarmaceutyk pod względem fizjologicznym i biochemicznym zachowują się tak samo, jak stabilny ligand.

Radiofarmaceutyk jest wychwytywany, metabolizowany lub uczestniczy w procesach fizjologicznych zachodzących w danej tkance. Obrazy uzyskane w badaniach PET oraz SPECT są zatem reprezentacją graficzną metabolizmu badanego narządu, a nie jego cech anatomicznych takich jak wielkość czy położenie. Jako ciekawostkę można podać, że jednym z ważniejszych czynników w rozszerzaniu możliwości systemów PET było właśnie wprowadzenie jako znacznika 2-fluorodeoxy-D-glukozy (2FDG) przez grupę z Brookhaven. W sierpniu 1976 r. po raz pierwszy podano ją dwóm zdrowym ochotnikom na University of Pennsylvania. Obrazy mózgu uzyskane skanerem magnetycznego rezonansu jądrowego wykazały zwiększone stężenie FDG w tym organie, wynikające z faktu, że ludzki mózg stale potrzebuje glukozy, która dostarcza mu energii potrzebnej do prawidłowego funkcjonowania. Jak się okazało przy dalszych badaniach komórki rakowe również czerpią energię drogą fermentacji glukozy, co mocno stymuluje ich namnażanie. Dlatego też przy diagnostyce onkologicznej, która stanowi główną część badań PET, wprowadzono 2-fluorodeoxy-D-glukozę jako ligand, biorąc pod uwagę wzmożony metabolizm tego znacznika zachodzący w narządach dotkniętych mutacją onkologiczną. Główną rolę przy badaniu PET odgrywa jednak sam beta-emiter. Radioizotopy podawane pacjentom należą do grupy pierwiastków budujących ludzki organizm lub ich analogów. W tym celu wykorzystywane są najczęściej: węgiel ^{11}C , tlen ^{15}O , azot ^{13}N i fluor ^{18}F . Ich główną zaletą jest możliwość włączenia do ligandów metabolizowanych w organizmie ludzkim. Izotopy te charakteryzują się jednak relatywnie krótkim okresem połowicznego rozpadu, co z punktu widzenia ochrony radiologicznej i ekonomii jest bardzo niepraktyczne. Czas połowicznego rozpadu fluoru ^{18}F to około 2 godziny. Aby uzyskać jego niezbędną ilość do przeprowadzenia zaplanowanych badań, w wyniku syntezy musimy otrzymać nadwyżkę radiofarmaceutyku – tak, aby wystarczyło go na dłuższy czas. Nadmiar radioizotopu oznacza zwiększone narażenie personelu na promieniowanie, a także podwyższone koszty produkcji. Ponadto większość jednostek PET nie posiada własnej linii produkcyjnej radionuklidów i jest zmuszona do sprowadzania ich z innych ośrodków. Należy zatem doliczyć czas potrzebny na transport substancji, który zazwyczaj mocno przewyższa 2 godziny, co oznacza że jednostka musi zamówić przynajmniej dwa razy więcej radioizotopu niż faktycznie wykorzystuje, co oczywiście znacznie podwyższa koszt badania. Konieczne jest również operowanie dużymi

aktywnościami radioizotopu, istotnie przekraczającymi aktywności niezbędne do przeprowadzenia badania, co zwiększa narażenie personelu.

Z drugiej strony krótki czas połowicznego rozpadu oznacza szybkie wydalenie substancji radioaktywnej z organizmu, co zmniejsza narażenie osób postronnych na promieniowanie i umożliwia opuszczenie ośrodka przez pacjenta w krótkim czasie po badaniu.

W badaniach scyntygraficznych oraz SPECT wykorzystuje się radioizotopy emitujące promieniowanie γ . Do najpopularniejszych należą: ^{99}Tc – technet o czasie połowicznego zaniku 6h oraz ^{131}I – jod o czasie połowicznego rozpadu 8 dni.

6.4. Procedura przygotowania dawek

Mało który ośrodek w Polsce posiada linię produkującą izotopy. Sprowadzane one są (w większości) z Berlina (Eckert & Ziegler Isotope Products GmbH); drugim ośrodkiem zaopatrującym jest Wiedeń. Izotopy są dostarczane do Polski drogą lotniczą, a następnie transportowane pojazdem uprzywilejowanym na ściśle wyznaczone godziny (najczęściej jedna porcja przywożona jest rano, a druga popołudniem). Nierzadko jednak zdarzają się opóźnienia spowodowane warunkami atmosferycznymi bądź też innymi czynnikami zewnętrznymi. Izotopy przychodzą w osłonach z ołowiu zapieczętowane i zabezpieczone kodem dostępu. Ośrodek otrzymuje osobno kod wraz z dokumentacją przyjęcia izotopu. Jest to dodatkowe zabezpieczenie przed otwarciem źródła przez osobę nieuprawnioną.



Rys. 6.1. Fiolka z izotopem w osłonach, w których jest dostarczana do ośrodka [źr. własne]

Rano fizyk ma obowiązek wykonać kalibrację urządzenia służącego do przetaczania izotopu. Wykonuje on początkowe wygrzewanie oraz testy: stabilności, precyzji i powtarzalności pomiaru wbudowanej komory jonizacyjnej. W ośrodkach PETowskich taką kalibrację wykonuje się np. źródłem Cezu-137 o znanej aktywności wysyłającym promieniowanie o energii 660 keV, zbliżonej do 511 keV. Następnie technik wprowadza dane pacjentów oraz zadane aktywności do komputera. Dane te transferowane są do komory manipulacyjnej z dyspenserem. Komora jest tak skonstruowana, by zapewnić minimalny kontakt technika z izotopem. Technik wsuwa ręce do środka, tylko wtedy kiedy jest to niezbędne, aby móc nimi operować i np. poprawić ułożenie fiolki. Komora posiada obudowę z ołowiu i dodatkowe osłony mobilne tak zwane cegiełki do dodatkowego zabezpieczenia (obłożenia dookoła) fiolki z izotopem. Osoba nadzorująca cały proces kontroluje go przez osłonę ze szkła ołowiowego. Dodatkowo technik ubrany jest w fartuch z osłoną na tarczyce oraz gumowe rękawiczki na dłoniach.



Rys. 6.2. Technik przy komorze manipulacyjnej [źródło własne]

Procedura przygotowania dawek przedstawia się następująco: izotop wkłada się w osłonie do specjalnej windy, która dostarcza go do dyspensera. Następnie trzeba ręcznie połączyć fiolkę z izotopem z roztworem ligandu oraz z roztworem soli fizjologicznej za pomocą tzw. „kitu” czyli zestawu jednorazowego użytku służącemu do przetoczenia izotopu za pomocą pompy perystaltycznej. Gotowy radiofarmaceutyk zbiera się w zbiorniku pośredniczącym, z którego dyspenser pobiera próbkę, która następnie wędruje do komory jonizacyjnej. Tu bada się jej aktywność, biorąc pod uwagę czynnik osłabienia przez nałożoną osłonę oraz występujące na terenie ośrodka tło. Na podstawie zmierzonej aktywności dyspenser dopełnia strzykawkę roztworem do zadanego poziomu. Reszta preparatu jest

rozdozowywana do pozostałych strzykawek, obudowanych osłonami z wolframu, a następnie składowana w szuflach.



Rys. 6.3. Technik przygotowujący dawki [źródło własne]

6.5. Zabezpieczenia i osłony stosowane na „ścieżce pacjenta”

Należy pamiętać, że przy badaniach z radiofarmaceutykami o krótkich czasach rozpadu bardzo istotna jest precyzja czasu podania, ponieważ urządzenie przygotowuje radiofarmaceutyk o aktywności zadanej na określoną godzinę. Pacjent udaje się do pokoju zabiegowego, gdzie pielęgniarka zakłada mu na rękę wenflon. Następnie przechodzi do izolatki, w której czeka na podanie radiofarmaceutyku. Gotowa dawka czeka na podanie w specjalnej walizeczce zazwyczaj na tyłach ośrodka lub w izolowanej części.



Rys. 4.8. Walizeczka stanowiąca dodatkową osłonę dla strzykawki z izotopem [źr. własne]

Za podanie substancji odpowiedzialna jest pielęgniarka – jest więc ona najbardziej narażona na działanie promieniowania. Aby zmniejszyć narażenie występujące w momencie podawania, strzykawka zabezpieczona jest ołowianą zasłoną.



Rys. 6.4. Strzykawka w osłonie [źródło własne]

Pacjent spędza w izolatce odpowiednią ilość czasu, potrzebną do rozprzestrzenienia się radiofarmaceutyku po jego ciele. Pacjent ma zabronione w tym czasie wykonywanie jakichkolwiek czynności angażujących mięśnie szkieletowe oraz mózg. Powinien pozostać w spoczynku z zamkniętymi oczami. Ma to na celu umożliwienie prawidłowego rozkładu radiofarmaceutyku w ciele i uniknięcie sytuacji, że izotop zgromadzi się w miejscu niepożądanym. Następnie pacjent proszony jest o udanie się do toalety w celu oddania moczu (pęcherz, w którym zgromadzi się izotop może wprowadzać zakłócenia do obrazu) i kierowany jest do skanera, gdzie wykonuje się mu się odpowiednie badanie diagnostyczne (SPECT lub PET). Pozycjonowanie pacjenta trwa kilka minut, w zależności czy chory potrzebuje pomocy czy jest w stanie samodzielnie przybrać odpowiednią pozycję ciała. Pomaga mu w tym technik, jest więc kolejną osobą wystawioną bezpośrednio na promieniowanie jonizujące. Po badaniu pacjent udaje się do szatni, przebiera się i niezwłocznie opuszcza budynek. Ponieważ jeszcze nie wszystkie jądra izotopu uległy rozpadowi, zaleca się unikania kontaktu z kobietami w ciąży, karmiącymi piersią oraz małymi dziećmi (do 16 roku życia) przez 6 godzin po badaniu.

7. Literatura

- [AAPM05] AAPM Task Group 108, *PET and PET/CT Shielding Requirements, 2005*, American Association of Physicist in Medicine
- [And07] Anderson J., *PET Shielding and Radiation Protection, 2007, presentation*, AAPM Summer School
- [Cru] Cruzate J., Discacciatti A., *Shielding of medical facilities. Shielding design considerations for PET-CT facilities*, Nuclear Regulatory Authority
- [Fre] Frey G. D., *PET Shielding, presentation*, Departement of Radiology Medical University of South Carolina
- [Fui09] Fujibuchi T., Iimori T., Isobe T., Masuda Y., Uchida Y., Matsubayashi F., Sakae T., *Measurement of absorbed doses in organs of medical staff at 18F-FDG pet examination, 2009*, Japanese Society of Radiological Technology and Japan Society of Medical Physics
- [Gui05] Guillet B., Quentin P., Waultier S., Bourrelly M., Pisano P., Mundler O., *Technologist Radiation Exposure in Routine Clinical Practice with F-FDG PET, 2005*, Journal of Nuclear Medicine Technology
- [Hry01] Hryniewicz A.Z., *Człowiek i promieniowanie jonizujące, 2001*, Wydawnictwo Naukowe PWN
- [IAEA] International Atomic Energy Agency, *Radiation Protection in PET/CT, presentation*
- [Kub] praca pod redakcją Kubickiej M. i Barczyk J., *Skuteczna ochrona radiologiczna w medycynie*, Dashofer
- [Lex] Internet: portal www.lex.pl – *akty prawne i orzeczenia*
- [Pro09] Projekt techniczny ochrony radiologicznej Pracowni Akceleratora Medycznego Elekta Synergy w Białostockim Centrum Onkologii, 2009

- [Rad06] *Radiation Protection In The Design Of Radiotherapy Facilities, Safety Reports Series No. 47*, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2006,
- [Sob09] Sobkowski J., *Chemia radiacyjna i ochrona radiologiczna*, 1996, Wydawnictwo Naukowe PWN
- [Zai06] Zaidi H., Montandon M., *The New Challenges of Brain PET Imaging Technology*, 2006, Bentham Science Publishers Ltd.

Zdjęcia wykonano dzięki uprzejmości Pracowników Mazowieckiego Centrum PET-CT.