

Stručni rad

CIKLOTRON: PROIZVODNJA RADIOFARMACEUTIKA ZA POTREBE ZDRAVSTVA – PROCJENA APSORBIRANE DOZE RADNIKA

Hrvoje PRPIĆ¹, Alfred ŠVARC² i Robert BAGARIĆ²

Ruđer Medikal Ciklotron d.o.o.¹, Institut Ruđer Bošković², Zagreb, Hrvatska

Primljeno u lipnju 2010.
Prihvaćeno u kolovozu 2010.

Dijagnostički postupci i liječenje iz područja nuklearne medicine podrazumijevaju uporabu radionuklida ili radiofarmaceutika, tj. farmaceutika u kojima su radionuklidi vezani na druge, biološki aktivne kemijske spojeve, u svrhu njihova označavanja i praćenja distribucije radioobilježivača u živome biološkom sustavu. Specifičnost radiofarmaceutika je u mogućnosti uporabe metoda nuklearne detekcije za prikazivanje vremenskog tijeka njihova prostornog nakupljanja u određenom organu, odnosno njihova ulaska u metaboličke procese. Na taj način njihovom uporabom moguće je prikazati funkcionalne promjene, za razliku od klasičnih radioloških pretraga s pomoću kojih se prikazuju morfološke promjene u organima. U ovom radu prikazane su izmjerene brzine doza γ -zračenja na pojedinim mjestima unutar proizvodnog postrojenja Ruđer Medikal Ciklotrona (RMC), koje rabi 18 megaelektronvolti ciklotron Cyclone 18/9 HC. Navedene su očekivane brzine doza za djelatnike RMC-a po specifičnim radnim zadacima i mjestima. Na osnovi procijenjenog vremena boravka radnika na tim lokacijama, procijenjena je godišnja apsorbirana doza. Rezultati mjerenja uspoređeni su sa zakonskim granicama i preporukama. Pokazuje se da je koncept minimalizacije izlaganja radioaktivnom zračenju – ALARA („As Low As Reasonably Achievable”), koje preporučuje hrvatski zakonodavac, maksimalno ispunjen za pogon RMC-a.

KLJUČNE RIJEČI: *fludeoksiglukoza, pozitronski emiteri, zaštita od zračenja*

Dijagnostički postupci i liječenje iz područja nuklearne medicine podrazumijevaju uporabu radionuklida ili radiofarmaceutika, tj. farmaceutika u kojima su radionuklidi vezani na druge, biološki aktivne kemijske spojeve u svrhu njihova označavanja i praćenja njihove metaboličke distribucije u živome biološkom sustavu. Važna značajka radionuklida i radiofarmaceutika jest činjenica da je metodama nuklearne detekcije moguće prikazati njihov prostorni raspored u određenom organu, staničnim receptorima, odnosno ulazak u metaboličke procese. Na taj način, njihovom uporabom moguće je prikazati funkcionalne promjene za razliku od klasičnih radioloških pretraga s pomoću kojih se prikazuju morfološke promjene u organima.

Radionuklidi koji se rabe u zdravstvu mogu biti čisti gama-emiteri, emiteri miješanih vrsta nuklearnog

zračenja ili pozitronski emiteri. Proizvodnja gama-emitera moguća je uz pomoć nuklearnih reaktora i ciklotrona, dok se pozitronski emiteri, kao neutron-deficijentne nuklearne jezgre, proizvode isključivo u ciklotronu putem inducirane reakcije nabijenom česticom.

Američki fizičar Ernest Orlando Lawrence izumio je ciklotron daleke 1929. godine, ali se tek u posljednjih dvadesetak godina ciklotron značajnije rabi u proizvodnji različitih radionuklida za potrebe zdravstva. Ciklotronski akceleratori razlikuju se po svojoj veličini, odnosno maksimalnoj energiji u MeV (megaelektronvolt). Najmanji ciklotroni u upotrebi su oni do 3,7 MeV, koji ubrzavaju samo deuterone (d), a rabe se uglavnom u sklopu bolnica za proizvodnju ¹⁵O. Najširu primjenu našli su ciklotroni do 12 MeV odnosno 20 MeV, s time što potonji imaju mogućnost

ubrzavanja protona (p) i deuteronu. Detaljan prikaz različitih veličina ciklotrona i njihova namjena dani su na tablici 1 (1).

Za potrebe pozitronske emisijske tomografije u najširoj su upotrebi tzv. konvencionalni radionuklidi, ponajprije ^{18}F i bionuklidi ^{11}C , ^{13}N i ^{15}O . Radionuklid ^{18}F proizvodi se u ciklotronskom akceleratoru p,n reakcijom iz obogaćene vode H_2^{18}O , a ugrađuje se u više radiofarmaceutika od kojih se najviše rabi fludeoksiglukoza (FDG) za dijagnostiku tumorskih bolesti. ^{18}F također se ugrađuje u 3,4-dihidroksi-6-fluoro-DL-fenilalanin (F-DOPA) za dijagnostiku neuroendokrinih tumora i Parkinsonove bolesti, F-kolin u dijagnostici tumora prostate, F-timidin za prikaz stanične proliferacije. Fizikalna svojstva konvencionalnih radionuklida proizvedenih u ciklotronu prikazana su na tablici 2 (2).

Zajednička karakteristika konvencionalnih radionuklida proizvedenih na ciklotronu relativno je kratko vrijeme poluraspada, u kojem se mora provesti dijagnostički postupak. Od kliničkih indikacija iz područja neuroloških bolesti, različiti konvencionalni radiofarmaceutici rabe se za potrebe dijagnostike demencije, ishemije, moždanog udara, Parkinsonove

bolesti, tumora mozga, shizofrenije i epilepsije, dok su najvažnije kardiološke indikacije ishemija, odnosno vijabilnost srčanog mišića. Suvremena onkološka dijagnostika danas je gotovo nezamisliva bez nalaza pozitronske emisijske tomografije uporabom fludeoksiglukoze (FDG), a najčešće indikacije su u bolesnika sa sumnjom na: solitarni čvor u plućima i karcinom pluća, kolorektalni karcinom, limfom, melanom, tumor u području glave i vrata, karcinom dojke, štitnjače itd. Posebna vrijednost uporabe fludeoksiglukoze u dijagnostici tumorskih bolesti je mogućnost stupnjevanja bolesti, kao i prikaz odgovora na primijenjenu terapiju.

U novije vrijeme od posebnog je značenja mogućnost uporabe radionuklida s ciljem proizvodnje radio-imunokonjugata u svrhu dijagnostike i radioimunoterapije. Ovi radionuklidi čine tzv. nekonvencionalnu grupu, a zbog svojih fizikalnih i kemijskih svojstava posebno se ističu ^{64}Cu , ^{89}Zr i ^{124}I . Naime, ovi radionuklidi imaju duže vrijeme poluraspada čime se osigurava optimalna biodistribucija i omogućava njihova detekcija.

Proizvodnja radionuklida u ciklotronu i sinteza radiofarmaceutika kompleksni su procesi koji zahtijevaju visoki stupanj radiološke zaštite. Iako

Tablica 1 Ciklotroni koji se rabe u proizvodnji radionuklida

Klasifikacija	Karakteristike	Energije / MeV	Važniji proizvedeni nuklidi
Razina I	Jedna čestica (d)	<4	^{15}O
Razina II	Jedna čestica (p)	≤12	^{11}C , ^{13}N , ^{15}O , ^{18}F
Razina III	Jedna ili dvije čestice (d, p)	≤20	^{11}C , ^{13}N , ^{15}O , ^{18}F , ^{86}Y , ^{124}I , (^{123}I , ^{67}Ga , ^{111}In)
Razina IV	Jedna ili više čestica (p, d, ^3He , ^4He)	≤40	^{38}K , ^{73}Se , $^{75-77}\text{Br}$, ^{123}I , ^{81}Rb , (^{81}Kr), ^{67}Ga , ^{111}In , ^{201}Tl , ^{22}Na , ^{57}Co , ^{44}Ti , ^{68}Ge , ^{72}As , ^{140}Nd
Razina V	Jedna ili više čestica (p, d, ^3He , ^4He)	≤100	^{28}Mg , ^{72}Se , ^{82}Sr , $^{117\text{m}}\text{Sn}$, ^{123}I
Razina VI	Jedna čestica (p)	>100	^{67}Cu , ^{68}Ge , ^{82}Sr i dr.

Tablica 2 Karakteristike fizičkog raspada konvencionalnih PET radionuklida proizvedenih u ciklotronu

Radionuklid	Vrijeme poluraspada Sv ± SD	Vrsta raspada [omjer grananja %]	Produkcijiski put	E(β^+) / keV	Krajnja energija β^+ / keV	Obilnost I_{β^+} / %	E γ / keV [intenzitet, I_{γ} / %]
^{11}C	(1223 ± 12) s	β^+ [100]	$^{14}\text{N}(\text{p}, \alpha)^{11}\text{C}$	385,6 (4)	960,2 (9)	99,759 (15)	511,0 [199,5]
^{13}N	(9,965 ± 4) min	β^+ [100]	$^{16}\text{O}(\text{p}, \alpha)^{13}\text{N}$	491,82 (12)	1198,5 (3)	99,8036 (20)	511,0 [199,6]
^{15}O	(122,24 ± 16) s	β^+ [100]	$^{15}\text{N}(\text{p}, \text{n})^{15}\text{O}$ $^{14}\text{N}(\text{d}, \text{n})^{15}\text{O}$	735,28 (23)	1732,0 (5)	99,9003 (10)	511,0 [199,8]
^{18}F	(109,7 ± 5) min	β^+ [100]	$^{18}\text{O}(\text{p}, \text{n})^{18}\text{F}$ $^{20}\text{Ne}(\text{d}, \alpha)^{18}\text{F}$	249,8 (3)	633,5 (6)	96,73 (4)	511,0 [193,5]

PET – pozitronska emisijska tomografija.

to možda i nije općepoznato, γ -zračenje koje je po svojim fizikalnim svojstvima mnogo sličnije čestičnim zračenjima poput α i β zračenja, ipak spada u istu kategoriju zračenja kao radiovalovi i svjetlost. Jedina je razlika u valnoj duljini. Naime, ekstremno kratka valna duljina od tipično 10^{-15} metara koja karakterizira većinu γ -zračenja koje će se stvarati u ciklotronu, uzrokuje njegovu vrlo visoku frekvenciju, a time i vrlo visoku energiju jediničnog kvanta prijenosa elektromagnetskog zračenja – fotona.

U ciklotronu će γ -zračenje štetno za radnike i okoliš nastajati na dva odvojena načina:

1. Prilikom samog rada ciklotrona
 - a. Primarno radioaktivno zračenje nastalo zaustavljanjem 18 megaelektronvoltnih protona
 - b. Sekundarno radioaktivno zračenja nastalo zaustavljanjem $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ reakcijom nastalih neutrona
2. Raspadom namjenski stvorenog radioizotopa ^{18}F , i to:
 - a. tijekom njegova transporta od ciklotronske dvorane do vrućih ćelija
 - b. tijekom kemijske sinteze radiofarmaceutika FDG-RMC
 - c. tijekom pakiranja i transporta gotovog proizvoda
 - d. tijekom kontrole kvalitete u laboratoriju

U ovom radu prikazat ćemo koje su izmjerene brzine doza γ -zračenja na pojedinim mjestima unutar proizvodnog postrojenja Ruđer Medikal Ciklotrona (RMC), gdje se rabi 18 megaelektronvoltni ciklotron Cyclone 18/9 HC (slika 1) te koje su očekivane brzine doza za djelatnike RMC-a po specifičnim radnim zadacima i mjestima.



Slika 1 Ciklotron - IBA Cyclone 18/9 HC

Proizvodnja radionuklida u ciklotronu

Fluor-18 (^{18}F), pozitronski emiter, proizvodi se u standardnom kružnom ubrzivaču čestica – ciklotronu koji u uvjetima vrlo visokog vakuuma negativne ione vodika ubrzava do energije od 18 MeV. Prolaskom kroz ugljikovu foliju ionu vodika skida se elektronski omotač, i on se u obliku protona usmjeruje na nuklearnu metu koja se sastoji od “obogaćene vode” (H_2^{18}O). Reakcija od interesa je $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ koja ima razmjerno velik udarni presjek na tim energijama. Radi tehnološke optimizacije proizvodnja se zbiva istodobno na dvije XXL mete korisnog volumena 3,1 mL, smještene na suprotnim stranama ciklotrona, koje se istodobno ozračuju dvama protonskim snopovima intenziteta 75 μA . Stvorena aktivnost ^{18}F u meti proporcionalna je duljini ozračivanja mete, a maksimalna moguća aktivnost koja se u realnom vremenu u ciklotronu može stvoriti istodobnim ozračivanjem dviju meta iznosi 370 GBq (10.000 mCi). Prilikom procesa ozračivanja mete protonima stvaraju se visoki, za život opasni intenziteti γ -zračenja (mjerena vrijednost intenziteta γ -zraka direktno ispred mete iznosi 0,6 Sv μA^{-1} struje snopa), a procijenjeno je da se također stvara visok broj od tipično 10^{10} neutrona u sekundi. Stoga se cijeli proces zbiva u unaprijed dizajniranome betonskom “bunkeru” čija je debljina zidova izvedena tako da je zračenje izvan njega u granicama propisanim zakonom.

Proizvedeni ^{18}F transportira se do vruće ćelije u kojoj teče proces sinteze u fludeoksiglukoze, koja se dalje transportira u vruću ćeliju za doziranje gotove injekcijske otopine. Vruće ćelije izgrađene su od olova debljine 90 mm, čime se osigurava potrebna radiološka zaštita operatera. Gotovi proizvod pakira se u olovne kontejnere debljine 32 mm za daljnji transport, a uzorak se kontrolira u laboratoriju za kontrolu kvalitete.

Brzine doza γ -zračenja, koje su polazna točka za procjenu ukupno primljenih doza radnika RMC-a na svim definiranim radnim zadacima, izmjerio je ovlaštenu servis za obavljanje stručnih poslova zaštite od ionizirajućeg zračenja EKOTEH dozimetrija d.o.o. Brzine doza γ -zračenja mjerene su uređajem Thermo Radiometer FH 40-L10, ser. br. 20268. Mjerenja su izvršena pri maksimalnoj produkciji ciklotrona, istodobnim ozračivanjem s dva protona intenziteta 75 μA na dvije XXL mete, pri čemu je proizvedeno 370 GBq (10.000 mCi) ^{18}F .

Procjena radiološke zaštite obavljena je prema sljedećim radnim zadacima i mjestima:

Tablica 3 Procjena apsorbirane doze radioaktivnog zračenja prema opisu posla

Radnik	Opis posla	Radno mjesto	Trajanje na dan / h	Brzina doze / $\mu\text{Sv h}^{-1}$	Dnevna doza / μSv	Trajanje na godinu / dan	Godišnja doza / μSv	Ukupna godišnja doza po radniku / mSv
Operater 1	Upravljanje ciklotronom	Kontrolna soba	2,00	0,18	0,36	220	79,20	6,77
	Servis i održavanje	Ciklotron	2,00	30,00	60,00	12	720,00	
	Servis i održavanje	Radionica	2,00	15,00	30,00	12	360,00	
	Pakiranje gotovog proizvoda	Tehnički prostor	0,50	102,00	51,00	110	5.610,00	
Operater 2	Čišćenje i priprema vrućih čelija	Proizvodnja FDG-a	0,50	0,50	0,25	40	10,00	6,08
	Sinteza FDG-a	Proizvodnja FDG-a	0,50	2,10	1,05	220	231,00	
	Doziranje FDG-a	Proizvodnja FDG-a	0,50	2,10	1,05	220	231,00	
	Pakiranje gotovog proizvoda	Tehnički prostor	0,50	102,00	51,00	110	5.610,00	
Operater 3	Kontrola kvalitete	Unos materijala	0,17	20,00	3,40	220	748,00	2,95
		Ispitivanje	1,00	10,00	10,00	220	2.200,00	

Operater 1

a) prilikom redovitoga dnevnog rada na ciklotronu – 2 h na dan u prostoru kontrolne sobe (upravljanje ciklotronom) (220 dana na godinu)

b) prilikom redovitoga dnevnog rada na pakiranju gotovog proizvoda – 0,5 h na dan u prostoru transportnog koridora (110 dana na godinu)

c) prilikom obavljanja servisa i održavanja:

I. ciklotron - ukupno 24 h na godinu u prostoru ciklotronske dvorane

II. radionica – ukupno 2 h na godinu u prostoru ciklotronske dvorane

Operater 2

a) za vrijeme redovitoga dnevnog rada na sintezi FDG-RMC – 0,5 h na dan u prostoru za sintezu i doziranje (220 dana na godinu)

b) za vrijeme redovitoga dnevnog doziranja FDG-RMC – 0,5 h na dan u prostoru za sintezu i doziranje (220 dana na godinu)

c) za vrijeme čišćenja i pripreme vrućih čelija – ukupno 40 h na godiu u prostoru za sintezu i doziranje

d) prilikom redovitoga dnevnog rada na pakiranju gotovog proizvoda u prostoru transportnog koridora – 0,5 h na dan (110 dana na godinu)

Operater 3

a) prilikom unosa aktivnosti - 10 min na dan u prostoru laboratorija za kontrolu kvalitete (220 dana na godiu)

b) prilikom mjerenja – 1 h na dan u prostoru laboratorija za kontrolu kvalitete (220 dana na godinu)

Procjena apsorbirane doze zračenja radnika u pogonu ciklotrona

Na osnovi provedenih mjerenja procijenili smo dozu radioaktivnog zračenja koju svaki radnik RMC-a dobije tijekom jedne godine na određenim

radnim zadacima, odnosno po radnim mjestima. Rezultati mjerenja i procjene godišnjih doza prikazani su na tablici 3.

Navedena mjerenja i procjena godišnjih apsorbiranih doza upućuju da bi operater 1 mogao primiti ukupnu godišnju dozu od 6,77 mSv, operater 2 6,08 mSv, dok će operater 3 primiti 2,95 mSv.

RASPRAVA

Prema Zakonu o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti (3), granice izlaganja u obliku efektivne apsorbirane doze zračenja, za profesionalce pa tako i za radnike RMC-a, definirat će pravilnikom ravnatelj Državnog zavoda za radiološku i nuklearnu sigurnost. Do tada ostaju na snazi granice definirane u članku 5. Pravilnika o granicama izlaganja ionizirajućem zračenju te u uvjetima izlaganja u posebnim okolnostima i za provedbe intervencija u izvanrednom događaju (4):

Efektivna doza izloženih radnika ne smije u normalnim uvjetima tijekom rada biti veća od 100 mSv u razdoblju od pet uzastopnih godina, uz uvjet da niti u jednoj godini petogodišnjeg razdoblja efektivna doza ne smije biti veća od 50 mSv.

Nadalje, u provedbi zaštite od zračenja dosljedno se pridržavamo koncepta ALARA ("As Low As Reasonably Achievable"), tako da su granice propisane zakonom samo maksimalno dopuštene granice koje se ne smiju prijeći, a tendencija zaštite je da se ukupno primljena doza snizi što je moguće više, odnosno da se sve de na najmanju moguću mjeru koliko to promatrani tehnološki proces dopušta. Kod planiranja zaštite, kao orijentacijski broj za maksimalnu dopuštenu brzinu doze koja još omogućuje siguran rad odabrana je brzina doze od $10 \mu\text{Sv h}^{-1}$. To je upravo ona brzina doze kod koje uz 8-satni radni dan, 5 dana u tjednu (2000 radnih sati na godinu), radnik u razdoblju od 5 uzastopnih godina ne dobiva ukupnu efektivnu dozu višu od 100 mSv, a što je maksimalna zakonom propisana vrijednost (3). Skraćivanjem predvidivog boravka u ozračenim prostorima moguće je dodatno sniziti apsorbiranu dozu, no djelovanje u tim uvjetima opravdano je samo u slučajevima prijekne potrebe, odnosno kada se tehnološki zahtijevane radnje ne mogu obaviti drugačije.

Za vrijeme samog rada ciklotrona operater koji se nalazi u kontrolnoj sobi, primi tijekom jedne godine oko $79 \mu\text{Sv}$, što je rezultat odgovarajuće zaštite koja se postiže betonskim zidom debljine 2 metra.

Prilikom servisa i održavanja ciklotrona suočavamo se sa situacijom da radnici RMC-a zbog neizbježnih potreba tehnološkog procesa rade u uvjetima brzine doze veće od orijentacijske doze od $10 \mu\text{Sv h}^{-1}$. Razlog tomu je činjenica da se u unutrašnjosti ciklotrona, za vrijeme njegova normalnog rada, stvara određena količina radioaktivnih tvari čije je poluvrijeme raspada toliko dugačko (od nekoliko godina do nekoliko desetljeća) da se ne može čekati da njihovim raspadom trenutačna brzina doze padne na optimalni nivo. U trenucima kada se pristupa servisu ciklotrona, prosječna brzina doze u ciklotronskoj dvorani iznosi oko $30 \mu\text{Sv h}^{-1}$, zbog čega se trajanje boravka i sama intervencija maksimalno skraćuju. Stoga smo prisiljeni pristupiti drugoj opciji zaštite: radu u uvjetima povišene radioaktivnosti, ali uz skraćeno vrijeme boravka. Osim skraćivanja boravka u ozračenim prostorima, primjenjujemo i aktivne mjere zaštite pojedinca. Tako na primjer, za vrijeme rada u radionici, gdje je očekivana prosječna brzina doze nešto niža i ne očekujemo da prelazi $15 \mu\text{Sv h}^{-1}$, osoblje je dodatno šticeo olovnim blokovima i olovnim staklom, čime se ukupna apsorbirana doza dodatno smanjuje.

Adekvatnu zaštitu u prostoru za proizvodnju radiofarmaceutika pružaju olovne ćelije debljine 90 mm. S obzirom na to da radnik u ovom prostoru provede tipično 1,5 h na dan, procijenjena ukupna primljena godišnja doza iznosi 0,46 mSv. Od toga na sintezu i doziranje otpada 0,45 mSv, a na čišćenje vrućih ćelija tek 0,01 mSv na godinu.

Tijekom pakiranja gotovog proizvoda u tehničkom prostoru brzina doze u prostoru boravka operatera veća je od naše orijentacijske granice. Naime, debljina olovne stijenke transportnih spremnika (spremnici komercijalne izvedbe) iznosi tek 32 mm, što je znatno manje u usporedbi s debljinom zidova vruće ćelije od 90 mm. Stoga je smanjenje brzine doze u radnom prostoru zbog apsorpcije γ -zraka u olovu niže. Budući da se zbog kratkoće poluvremena raspada ^{18}F korisniku u pravilu transportiraju mnogostruko veće količine aktivnosti od njegovih dnevnih potreba, stvarne brzine doza izvan spremnika uočljivo su veće od $10 \mu\text{Sv h}^{-1}$. Na samoj površini spremnika mjerimo brzine doze veće od $200 \mu\text{Sv h}^{-1}$, a na udaljenosti od 1 m od spremnika mjerimo $30 \mu\text{Sv h}^{-1}$. Zaštita radnika se u ovom slučaju postiže na dva načina: maksimalnim skraćivanjem vremena boravka u neposrednoj blizini transportnog spremnika i maksimalnim udaljavanjem od njega. Koristeći se obim principima, procjenjujemo da očekivana doza pri ovoj aktivnosti iznosi 5,61 mSv na godinu, što je unutar zakonom

propisanih dopuštenih granica. Dodatnu zaštitu nije moguće primijeniti, ali se ukupno primljena doza može još dodatno sniziti, daljnjim skraćivanjem vremena postupka pakiranja.

Da bismo jednoliko rasporedili ozračenost radnika, pakiranje gotovog proizvoda ravnopravno smo rasporedili kao dio radnih zadataka operatera 1 i operatera 2. Uz takvu raspodjelu radnih zadataka pakiranja, ukupna godišnja apsorbirana doza iznosi 6,77 mSv (5,61 + 1,16) za operatera 1 te 6,08 mSv (5,61 + 0,47) za operatera 2.

Operater 3 je odgovoran za kontrolu kvalitete i jedini je izložen direktnom kontaktu s otvorenim izvorima zračenja tijekom manipulacije kontrolnim uzorcima. Ugradnjom dodatnih olovnih blokova koji se postavljaju između mjernih instrumenata i operatera, značajno je smanjena izloženost tijekom analitičkih ispitivanja. Operater je izložen nešto intenzivnijem zračenju tijekom unosa materijala čije je trajanje izuzetno kratko, dok preostalo vrijeme radi u uvjetima naše orijentacijske brzine doze. Procjenjuje se da ukupna godišnja doza koju taj operater primi iznosi oko 3 mSv.

Ruđer Medikal Ciklotron d.o.o. je u fazi pokusne proizvodnje, temeljem čega su izrađene navedene projekcije godišnjih doza, a koje se očekuju tijekom svakodnevnoga proizvodnog ciklusa. Kontinuirana mjerenja, koja će se provoditi tijekom proizvodnje,

bit će realan pokazatelj primljenih doza te indikator uvođenja dodatnih mjera zaštite ako se za to pokaže potreba.

ZAKLJUČAK

Na osnovi izvršenih mjerenja i obavljene procjene zaključujemo da je radiološka zaštita radnika RMC-a provedena na optimalan način. Predviđa se da će se primljene doze bilo kojeg radnika RMC-a apsolutno nalaziti u okvirima dopuštenim pozitivnim zakonskim propisima, a također konstatiramo da je dosljedno poštovan preporučeni princip ALARA, jer su procijenjene doze i višestruko niže od vrijednosti predviđenih zakonom.

LITERATURA

1. Qaim SM. Use of cyclotrons in medicine. *Radiat Phys Chem* 2004;71:917-26.
2. Holland JP, Williamson MJ, Lewis JS. Unconventional nuclides for radiopharmaceuticals. *Mol Imaging* 2010;9:1-20.
3. Zakon o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti. *Narodne novine* 28/2010.
4. Pravilnik o uvjetima i mjerama zaštite od ionizirajućeg zračenja za obavljanje djelatnosti s radioaktivnim izvorima. *Narodne novine* 125/2006.

Summary

ESTIMATED ABSORBED DOSES FROM EXPOSURE TO A CYCLOTRON USED IN PRODUCTION OF RADIOPHARMACEUTICALS

Nuclear medicine diagnostics and therapy use radiopharmaceuticals, which are pharmaceuticals with radionuclides attached to the biologically active chemical compound with the purpose of marking it in order to follow its metabolism in a living organism. The basic advantage of using radiopharmaceuticals is that they can be monitored by nuclear methods and their deposition in a particular organ or metabolic processes followed over time. Unlike classical radiology, which shows only morphological changes in an organ, with radiopharmaceuticals we can follow their functional changes.

This article discusses estimated occupational exposure of three workers to a cyclotron IBA Cyclone 18/9 at Ruđer Medikal Cyclotron Ltd. (RMC). The total absorbed annual dose is estimated to between 2.95 mSv and 6.77 mSv. The requirement of minimal exposure to any form of radiation – ALARA (“As Low As Reasonably Achievable.”), recommended by Croatian legislation, is fully met.

KEY WORDS: *FDG, positron emitters, radiation protection*

CORRESPONDING AUTHOR:

Hrvoje Prpić
Ruđer Medikal Ciklotron d.o.o.
Bijenička 54, 10000 Zagreb
E-mail: hrvoje.prpic@rmc.hr