



# ODREĐIVANJE ENERGIJSKIH SPEKTARA $^{60}\text{Co}$ U VODI POMOĆU $\text{CaF}_2:\text{Mn}$ i FRICKEOVOG DOZIMETRA

*Saveta MILJANIĆ i Maria RANOGAJEC-KOMOR*

Institut "Ruđer Bošković", Bijenička c. 54, P.O. Box 1016, 10000 Zagreb .

## UVOD

Cilj ovog rada je određivanje energijskih spektara fotona u različitim dubinama u vodi ozračenju s izvorom  $^{60}\text{Co}$ , uz korištenje para dozimetara:  $\text{CaF}_2:\text{Mn}$  koji ima veliku energijsku zavisnost u usporedbi s vodom i Frickeovog dozimetra koji je praktički ekvivalentan vodi. Ta metoda, nazvana "Tandem metoda", sastoji se u korištenju omjera energijskih zavisnosti odziva dvaju dozimetara za određivanje tzv. "efektivne energije" upadnog zračenja (1).

Osnovu za evaluaciju energijskih spektara čine podaci o energijskim spektrima kao funkcija dubine u vodi koje je računao Seltzer za veliki pločasti izvor  $^{60}\text{Co}$  (2). Zračenja dozimetara su obavljena u vodenom fantomu, na panoramskom izvoru  $^{60}\text{Co}$  aktivnosti oko 2 PBq, u Institutu "Ruđer Bošković" (IRB). Omjeri doza očitanih s  $\text{CaF}_2$  i Frickeovim dozimetrom, koji daju korekcijske faktore Fricke- $\text{CaF}_2$ , uspoređeni su s korekcijskim faktorima voda- $\text{CaF}_2$  koji su izračunati pomoću Burlinove teorije šupljine (3) za Seltzerove spektre.

## EKSPERIMENTALNI DIO

U radu su korišteni detektori  $\text{CaF}_2:\text{Mn}$  u obliku diska (4.6 mm dia x 0.7 mm), proizvedeni u Institutu "Jožef Stefan" u Ljubljani.

Detektori su zračeni u držaču od Plexiglassa (PMMA) u različitim dubinama vodenog fantoma, koji se nalazio na udaljenosti 2.5 m od osi izvora. Detektori su također zračeni u držačima smještenim na vanjsku površinu fantoma (prema izvoru). Vanjske dimenzije fantoma bile su visina 30 cm, širina 30 cm i dubina 42 cm.

TL detektori su kalibrirani ozračenjem na izvoru  $^{60}\text{Co}$  u Primarnom standardnom dozimetrijskom laboratoriju, u Budimpešti.

Detalji eksperimentalnog postupka opisani su u prethodnom radu (4).

Apsorbirane doze u vodi ( $D_w$ ) izračunate su iz doza mjerenih ferosulfatnim (Frickeovim) dozimetrom ( $D_F$ ). Budući da radijacijsko-kemijski prinos, G, feri iona ovisi o energiji fotona, G vrijednosti za dano polje zračenja "i" određene su za pojedine energije grafičkom interpolacijom iz publiciranih vrijednosti (5), te je za dani spektar energija izračunata težinska srednja vrijednost. Tako je doza apsorbirana u vodi za određeno polje zračenja dana sa

$$(D_w)_i = (G_{1.25}/G_i)_F \check{S}(\mu_{en}/\rho)_{w,F} (D_F)_i \quad // /$$

gdje je  $(G_{1.25}/G_i)_F$  omjer G vrijednosti za fotone od 1.25 MeV i za fotone spektra energija "i", a  $(\mu_{en}/\rho)_{w,F}$  omjer masenih koeficijenata apsorpcije energije za vodu i Frickeovu otopinu uprosječen za spektar energija "i". Vrijednosti  $(G_{1.25}/G_i)_F$  i  $(\mu_{en}/\rho)_{F,w}$  za spektre u vodenom fantomu dane su u Tablici 1. pri čemu treba napomenuti da vrijedi odnos  $(\mu_{en}/\rho)_{w,F} = 1/(\mu_{en}/\rho)_{F,w}$ .

## RAČUNSKI DIO

Za fotone  $^{60}\text{Co}$ , TL detektori su, s obzirom na svoje dimenzije, dijelom "fotonski detektori", a dijelom "detektori elektrona". U takvim slučajevima doza se računa prema Burlinovoj općoj teoriji šupljine, koja uključuje šupljine svih veličina (3). Doza u detektoru ( $D_d$ ) u odnosu na dozu u okolnom mediju ( $D_m$ ) dana je sa

$$D_d/D_m = f = d \cdot s_{d,m} + (1-d) \cdot (\mu_{en}/\rho)_{d,m} \quad /2/$$

gdje su  $s_{d,m}$  i  $(\mu_{en}/\rho)_{d,m}$  omjeri masenih moći zaustavljanja sudarima i masenih koeficijenata apsorpcije energije detektora i medija, a  $d$  je težinski faktor koji uzima u obzir veličinu detektora, a izračunat je iz izraza  $d = (1 - e^{-\beta g})/\beta g$ , gdje je  $\beta$  efektivni maseni koeficijent atenuacije elektrona, a  $g$  prosječna duljina puta kroz detektor.

Za TL detektore smještene u držač od PMMA ( $m = \text{PMMA}$ ) i uzimajući u obzir da je u uvjetima elektronske ravnoteže u oba materijala, doza u PMMA ( $D_{\text{PMMA}}$ ) u odnosu na dozu u vodi ( $D_w$ ) jednaka omjeru masenih koeficijenata apsorpcije energije za PMMA i vodu, jednadžba /2/ postaje

$$f_{13} = D_d/D_w = d \cdot s_{d,\text{PMMA}}(\mu_{en}/\rho)_{\text{PMMA},w} + (1-d) \cdot (\mu_{en}/\rho)_{d,w} \quad /3/$$

gdje je  $f_{13}$  korekcijski faktor voda-dozimetar za Burlinov izraz. Budući da su dozimetri kalibrirani u "čistom" polju zračenja  $^{60}\text{Co}$ , vrijednosti korekcijskih faktora voda-dozimetar  $f_{13}$  za svaku dubinu u vodenom fantomu su normalizirani na vrijednosti računane za primarno zračenje  $^{60}\text{Co}$  (oznaka  $f_{13}^*$ ).

Seltzer (2) je računao energijske spektre fotona u različitim dubinama u vodi ozračenoj velikim pločastim izvorom  $^{60}\text{Co}$ . Osim doze i energijske fluencije kao funkcije dubine u vodi, dao je i spektre energijske fluencije za raspršenu komponentu u različitim dubinama. Udjeli energijske fluencije od neraspršene komponente,  $K_r/(K_o+K_s)$  dani su u Tablici 1. (indeksi "o" i "s" označavaju neraspršenu i raspršenu komponentu). Također, u istoj tablici dane su i srednje energije raspršene komponente, kao i srednje energije cijelog spektra (indeks "os") u različitim dubinama izračunate iz Seltzerovih podataka. Dani su također i omjeri  $(\mu_{en}/\rho)$  za  $\text{CaF}_2$  i vodu, PMMA i vodu, te Fricke i vodu, uprosječeni za spektre energija koje je dao Seltzer za različite dubine u vodi i za srednju energiju fotona od 1.25 MeV. Iako su Seltzerovi podaci dragocjeni, oni se ne mogu direktno primijeniti; kvaliteta zračenja određenog uređaja ovisi o njegovoj konstrukciji i geometriji ozračivanja.

Tablica 1. Podaci o Seltzerovim spektrima i spektrima na panoramskom izvoru  $^{60}\text{Co}$  u IRB za različite dubine u vodenom fantomu

Dubina u vodi	$K_o/(K_o+K_s)$	$\bar{E}_s$ (MeV)	$\bar{E}_{os}$ (MeV)	$(G_{1.25}/G_i)_F$	$(\mu_{en}/\rho)_{m,w}$		
					Fricke	PMMA	CaF <sub>2</sub>
<b>Seltzerovi spektri</b>							
1. $^{60}\text{Co}^1$	1.000	0.000	1.25	1.000	0.997	0.972	0.874
2. 0 cm	0.713	0.659	1.08	1.005	0.997	0.971	0.913
3. 2 cm	0.607	0.638	1.01	1.008	0.998	0.969	0.987
4. 5 cm	0.514	0.605	0.94	1.011	1.000	0.966	1.125
5. 10 cm	0.413	0.584	0.86	1.014	1.002	0.962	1.265
6. 20 cm	0.299	0.565	0.77	1.017	1.003	0.957	1.446
7. 40 cm	0.198	0.553	0.69	1.020	1.005	0.954	1.633
<b>IRB spektri</b>							
1. 0 cm	0.485	0.599	0.91	1.012	1.000	0.965	1.160
2. 2 cm	0.413	0.591	0.86	1.014	1.001	0.963	1.239
3. 5 cm	0.350	0.581	0.82	1.016	1.002	0.961	1.320
4. 10 cm	0.281	0.571	0.76	1.018	1.003	0.958	1.428
5. 20 cm	0.203	0.558	0.70	1.020	1.004	0.955	1.568
6. 40 cm	0.135	0.544	0.64	1.022	1.006	0.953	1.710

<sup>1</sup>Podaci za "čisti" spektar  $^{60}\text{Co}$ , tj. za srednju energiju fotona od 1.25 MeV

Pretpostavili smo da je, za ozračivanja u vodenom fantomu, rasipanje energije kroz vodu ekvivalentno onome koje je dao Seltzer, ali početni uvjeti su različiti i trebaju se odrediti. U tu svrhu, primjenom Burlinove teorije šupljine, analizirani su rezultati očitavanja doza CaF<sub>2</sub> u vodenom fantomu (relativno prema rezultatima za "čisti" izvor  $^{60}\text{Co}$ ), i rezultati dobiveni Frickeovim dozimetrom, koji je praktički ekvivalentan vodi. Kao rezultat te analize, određena je kvaliteta zračenja panoramskog izvora  $^{60}\text{Co}$  u IRB, a podaci o spektrima u vodi su također prikazani u Tablici 1, zajedno s težinskim omjerima  $(\mu_{en}/\rho)$ . Vrijednosti  $(\mu_{en}/\rho)$  uzete su iz literature (6).

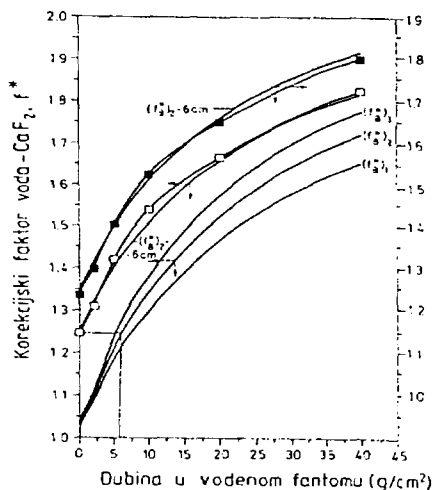
Za računanje težinskih omjera masenih moći zaustavljanja sudarima,  $(S/\rho)_{col}$ , korišten je spektar koji uključuje udjele niskoenergijskih Comptonovih odbijenih elektrona srednje energije od 0.47 MeV (7). Vrijednosti  $(S/\rho)_{col}$  uzete su iz literature (8), a omjeri su uprosječeni za dani spektar energija elektrona. Za naše

dozimetre smještene u držače od PMMA, izračunata vrijednost omjera  $(S/\rho)_{col}$  za  $CaF_2$  i PMMA bila je 0.816.

Za računanje vrijednosti  $\beta$  korištena su tri različita izraza: (a)  $\beta_1$  izračunat iz  $e^{-\beta R}=0.04$  (9); (b)  $\beta_2$  izračunat iz  $e^{-\beta R}=0.01$  (10); i (c)  $\beta_3=14/(T_{max})^{1.09}$  (11), gdje je  $R$  ekstrapolirani domet a  $T_{max}$  je maksimalna energija spektra elektrona. Za računanja  $\beta_1$  i  $\beta_2$  umjesto ekstrapoliranih dometa, korišteni su dometi na osnovi aproksimacije gubitka energije čestica procesom kontinuiranog usporavanja ( $R_{csda}$ ). Također, umjesto  $T_{max}$  korištena je srednja energija spektra za svaku dubinu. Vrijednosti  $R_{csda}$  za srednje energije spektra računane su iz tabeliranih vrijednosti (9).

## REZULTATI I RASPRAVA

Rezultati evaluacije spektara fotona prikazani su na Slici 1. Eksperimentalna mjerenja s dozimetrima  $CaF_2$  relativno prema Frickeovom dozimetru kao funkcija dubine u vodenom fantomu (neispunjeni kvadrati) uspoređena su s faktorima  $f^*_{B}$  računatim za Seltzerove spektre uz korištenje različitih vrijednosti  $\beta$ ;  $(f^*_{B})_1$ ,  $(f^*_{B})_2$ , i  $(f^*_{B})_3$  odgovaraju faktorima  $f^*_{B}$  računatim s  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  i  $\beta_3$ . Može se uočiti da dubina "0" za IRB izvor  $^{60}Co$  odgovara dubinama od  $5 \text{ g cm}^{-2}$  do  $7 \text{ g cm}^{-2}$  za Seltzerove spektre, ovisno o tome koje su vrijednosti  $\beta$  korištene u računanjima. Najbolje slaganje s eksperimentalnim rezultatima dobiveno je normalizacijom dubine "0" za IRB izvor na dubinu  $6 \text{ g cm}^{-2}$  Seltzerovog spektra [krivulja  $(f^*_{B})_2$ -6 cm na Slici 1]. Pri normalizaciji, vrijednosti  $K_o/(K_o+K_s)$  iz Tablice 1. za Seltzerove spektre pomnožene su faktorom 0.68, koji je ekvivalentan udjelu neraspršene komponente spektra na dubini od  $6 \text{ g cm}^{-2}$  relativno prema dubini "0" za Seltzerove spektre. Omjeri  $(\mu_{en}/\rho)$  za raspršene komponente dobivene su interpolacijom podataka računatih za Seltzerove spektre, a za ukupni spektar omjeri su izračunati uzimajući u obzir izračunate vrijednosti  $K_o/(K_o+K_s)$  za IRB spektre. Rezultati normalizacije na IRB spektre prikazani su u Tablici 1.



Slika 1. Usporedba omjera doza mjerenih s dozimetrima  $\text{CaF}_2$  i Frickeovim dozimetrom (neispunjeni kvadrati lijeva ordinata) s korekcijskim faktorima voda- $\text{CaF}_2$ ,  $f^*$ , za Seltzerove spektre, te usporedba omjera doza mjerenih s dozimetrima  $\text{CaF}_2$  i doza u vodi (ispunjeni kvadrati desna ordinata) s korekcijskim faktorima  $(f^*_{B})_2$  za IRB spektre,  $(f^*_{B})_2-6\text{cm}$ .

Doze u vodi izračunate su iz rezultata Frickeovog dozimetra prema jednadžbi (1) i podataka iz Tablice 1. Na Slici 1. omjeri doza mjerenih s  $\text{CaF}_2$  i doza u vodi (ispunjeni kvadrati) također su uspoređeni s vrijednostima  $(f^*_{B})_2-6\text{cm}$  (desna ordinata). Srednja vrijednost omjera izračunatih vrijednosti  $(f^*_{B})_2-6\text{cm}$  i eksperimentalnih vrijednosti  $f^*$  iznosi 1.005 sa standardnom devijacijom od  $\pm 0.009$ .

## ZAKLJUČAK

Da bi se izračunala doza u vodi iz rezultata doza mjerenih različitim dozimetrima, moraju se koristiti korekcijski faktori dozimetar-voda.

Kritičan parametar u računanju je omjer masenih koeficijenata apsorpcije energije, koji u slučaju dozimetrijskog sustava s različitom energijskom zavisnošću u usporedbi s vodom, bitno ovisi o spektralnim karakteristikama fotonog zračenja. Za evaluaciju spektra u vodi, može se koristiti par dozimetara s različitim energijskim zavisnostima. U tu svrhu pogodni su  $\text{CaF}_2$  i Frickeov dozimetar. Dobiveno je vrlo dobro slaganje eksperimentalnih vrijednosti korekcijskih faktora voda- $\text{CaF}_2$  i vrijednosti koje su izračunate korištenjem teorije šupljine.

## POPIS LITERATURE

1. Da Rosa L.A.R., Nette H.P. Thermoluminescent dosimeters for exposure assessment in gamma or x radiation fields with unknown spectral distribution. *Appl. Radiat. Isot.* 1988; 39:191-197.
2. Seltzer S.M. Photon fluence spectra and absorbed dose in water irradiated by cladded  $^{60}\text{Co}$  source plaque. *Radiat. Phys. Chem.* 1990; 35:703-707.
3. Burlin T.E. A general theory of cavity ionisation. *Brit. J. Radiol.* 1966; 39:727-734.

4. Miljanić S., Ranogajec-Komor M. Estimation of photon energy spectra of  $^{60}\text{Co}$  in water using  $\text{CaF}_2:\text{Mn}$  and Fricke dosimeters. *Radiat. Prot. Dosim.* 1996; 66:283-288.
5. International Commission on Radiation Units and Measurements. *Radiation Dosimetry: X rays Generated at Potentials of 5 to 150 kV. Report 17*, Bethesda, MD: ICRU Publications, 1970.
6. Hubbell J.H. Photon mass attenuation and energy-absorption coefficients from 1 keV to 20 MeV. *Int. J. Appl. Radiat. Isot.* 1982; 33:1269-1290.
7. St. George F., Anderson D.W., McDonald L. The electron spectrum at equilibrium depth from a narrow beam of  $^{60}\text{Co}$  photons. *Radiat. Res.* 1978; 75:453-461.
8. International Commission on Radiation Units and Measurements. *Stopping Powers for Electrons and Positrons. Report 37*. Bethesda, MD: ICRU Publications, 1984.
9. Janssens A., Eggermont G., Jacobs R., Thielens G. Spectrum perturbation and energy deposition models for stopping power ratio calculations in general cavity theory. *Phys. Med. Biol.* 1974; 19:619-630.
10. Burlin T.E., Chan F.K. The effect of the wall on the Fricke dosimeter. *Int. J. Appl. Radiat. Isot.* 1969; 20:767-775.
11. Paliwal B.R., Almond P.R. Electron attenuation characteristics of LiF. *Health Phys.* 1976; 31:151-153.

# ESTIMATION OF PHOTON ENERGY SPECTRA OF $^{60}\text{Co}$ IN WATER USING $\text{CaF}_2:\text{Mn}$ AND FRICKE DOSEMETERS

*Saveta MILJANIĆ and Maria RANOGAJEC-KOMOR*

Ruder Bošković Institute, Bijenička c. 54, P.O.B 1016, Zagreb, Croatia

To calculate dose in water from the results of doses measured by different dosimeters, dosimeter-to-water correction factors have to be used.

A critical parameter in the calculation is the ratio of mass energy absorption coefficients, which in the case of dosimetry systems with a different energy dependence in comparison with water, strongly depend on the spectral characteristics of the photon radiation. For the evaluation of spectra in water, the pair of dosimeters with different energy dependences could be used.

In this work, photon energy spectra at different depths in water irradiated with  $^{60}\text{Co}$  source were evaluated using a pair of dosimeters:  $\text{CaF}_2:\text{Mn}$  dosimeter with a large energy dependence in comparison with water and Fricke dosimeter which is practically water equivalent. The bases of the spectra evaluations are the photon fluence spectra as a function of depth in water calculated by Seltzer. The ratios of dose readings of  $\text{CaF}_2$  (relative to those obtained by an unshielded  $^{60}\text{Co}$  source) and the results obtained by Fricke dosimeter, giving Fricke-to- $\text{CaF}_2$  correction factors, were compared with water-to- $\text{CaF}_2$  correction factors calculated using the Burlin's cavity theory. The results enabled the evaluation of the quality of the  $^{60}\text{Co}$  source used. For estimated spectra, the experimental values of water-to- $\text{CaF}_2$  correction factors were in very good agreement with the values calculated using cavity theory.

**NEXT PAGE IS  
LEFT BLANK**