

KALIBRACIJA BRAHITERAPIJSKOG IZVORA ¹⁹²Ir VELIKE BRZINE DOZE: ANALIZA REZULTATA I NEPOUZDANOSTI

Tomislav Bokulić¹, Iva Mrčela¹, Mirjana Budanec¹, Branko Vekić²,
Ana Fröbe¹ i Zvonko Kusić¹

¹Klinika za onkologiju i nuklearnu medicinu,
KBC "Sestre milosrdnice", Zagreb

²Institut Ruđer Bošković, Zagreb

tbokulic@kbsm.hr

UVOD

Jedan od najznačajnijih koraka u programu osiguranja kvalitete brahiterapije radioaktivnim izvorima velike brzine doze (engl. *high dose rate* – HDR), je određivanje referentne brzine kerme u zraku (eng. *reference air kerma rate* – RAKR). Mjerenje RAKR ili jakosti kerme u zraku (engl. *air kerma strength*), odnosno kalibracija svakog novo instaliranog HDR izvora, provodi se u radioterapijskom centru neovisno o dostavljenoj proizvođačkoj specifikaciji – certifikatu izvora. U Klinici za onkologiju i nuklearnu medicinu, KBC "Sestre milosrdnice" se uređaj za naknadno uvođenje (engl. *remote afterloading device*) s izvorom iridija (¹⁹²Ir), Gammamed 12i (Varian, SAD), aktivnosti oko 10 Ci (oko 370 GBq), upotrebljava u HDR brahiterapiji ginekoloških karcinoma, te karcinoma nazofaringsa, jednjaka i bronha, već 10 godina. Izvor se mijenja svaka 3 – 4 mjeseca. Tijekom postupka izmjene izvora, planski se provodi niz sigurnosnih i tehničkih provjera samog uređaja za uvođenje izvora, upravljačke konzole te komunikacije računala s konzolom i uređajem.

HDR izvori se uobičajeno kalibriraju jednom od triju tehnika [1-3]: (1) mjerenjima u zraku pomoću Farmerove komorice uz odgovarajuće koeficijente kalibracije koji su dostupni putem sekundarnog standardnog laboratorija, (2) mjerenjima velikom ulaznom ionizacijskom komorom (engl. *re-entrant, well type chamber*) s posebnim držačem izvora, i (3) mjerenjima Farmerovom komoricom i aplikatorom s izvorom smještenima u plastičnom fantomu koji osigurava njihov točni i reproducibilni položaj.

U ovom radu prikazani su rezultati kalibriranja 23 izvora pomoću ulazne ionizacijske komore (Standard Imaging, Wisconsin, USA) velikog volumena (tehnika (2)). Odstupanja mjerenih od proizvođačkih specifikacija

uspoređena su s podacima iz literature. Načinjena je i procjena nepouzdanosti mjerenih *RAKR* veličina.

MATERIJAL I METODE

RAKR izvora ^{192}Ir velike brzine doze, promjera 0,6 mm i duljine 3,5 mm, određivana je redovito nakon provedene instalacije novog izvora. Uporabom kalibrirane ulazne ionizacijske komore, *RAKR* se može odrediti prema sljedećem izrazu [1,2]:

$$RAKR = N_{kal} \cdot I_{ion} \quad (1)$$

gdje je N_{kal} kalibracijski faktor komore, I_{ion} struja ionizacije korigirana za veličine koje utječu na mjerenu struju:

$$I_{ion} = I_m \cdot k_{el} \cdot k_r \cdot k_{Tp} \quad (2)$$

I_m je mjerena struja ionizacije korigirana za struju propuštanja (engl. *leakage*), k_{el} je kalibracijski koeficijent elektrometra, k_r korekcija zbog rekombinacije, a k_{Tp} korekcija tlaka i temperature aktualnih mjerenja u odnosu na referentna mjerenja istaknuta na kalibracijskom certifikatu. Korekcija zbog rekombinacije [2] računa se metodom mjerenja struje (naboja) ionizacije prema izrazu:

$$1/k_r = 4/3 - 1/3 \cdot (Q_1/Q_2) \quad (3)$$

gdje su Q_1 i Q_2 količine naboja mjerene komorom uz primjenu dva značajno različita napona (npr. 300 V i 150 V). U rutinskim postupcima kalibracije 23 izvora ^{192}Ir korištena je ulazna ionizacijska komora, kalibrirani elektrometar, termometar i barometar (Tablica 1).

Postupci su provođeni prema pisanom protokolu temeljenom na proizvođačkim specifikacijama i međunarodnim preporukama [1,2]. Višestruka mjerenja s dva izvora provedena su paralelno s dva kompleta identičnih ionizacijskih komora i sličnim elektrometrima (Tablica 1). Njima je ispitana preciznost mjerenja struje ionizacije i stabilnost odziva tijekom nekoliko tjedana mjerenja *RAKR*, neposredno prije izmjene izvora (~167,3 GBq) i kod potpuno novog izvora, odmah nakon njegove izmjene (~521,3 GBq). Određene su korekcije zbog rekombinacije te su ispitana svojstva osjetljivosti odziva komore obzirom na blizinu raspršujućeg sredstva i na aksijalni položaj izvora unutar komore.

Tablica 1. Opis i tehničke karakteristike mjerne opreme upotrijebljene u kalibraciji izvora i u dodatnim mjerenjima (IK – ionizacijska komora)

	IK 1	IK 2*
Proizvođač i model	Standard Imaging, HDR 1000 +	
Elektrometar	DCX 2000	MAX4000
Volumen (cm ³)	245	
Napon napajanja (V)	+ 300	
Efikasnost sakupljanja naboja	0,999	
Referentna točka mjerenja	50 mm	
Kalibracijski koeficijent	4,67E+05 Gy m ² h ⁻¹ A ⁻¹	4,647E+05 Gy m ² h ⁻¹ A ⁻¹
Nepouzdanost kalibracije	3 % (k = 2)	3 % (k = 2)

* Ionizacijska komora IK2 i elektrometar su u vlasništvu Instituta Ruđer Bošković

Procjena nepouzdanosti u određivanju vrijednosti struje ionizacije određena je prema formalizmu NIST-a [4]. Procjena uključuje nepouzdanosti korekcijskih faktora temperature, tlaka i elektrometra kao i nepouzdanosti preuzetih iz certifikata referentne opreme – kalibracijski koeficijent ovlaštenog laboratorija. U mjerenjima struje u obzir su uzete nepouzdanosti zbog očitavanja elektrometra, razlučivanja očitavanja, stabilnosti komore i linearnosti. Nepouzdanost korekcije zbog rekombinacije je procijenjena na istu veličinu kao i korekcija sama.

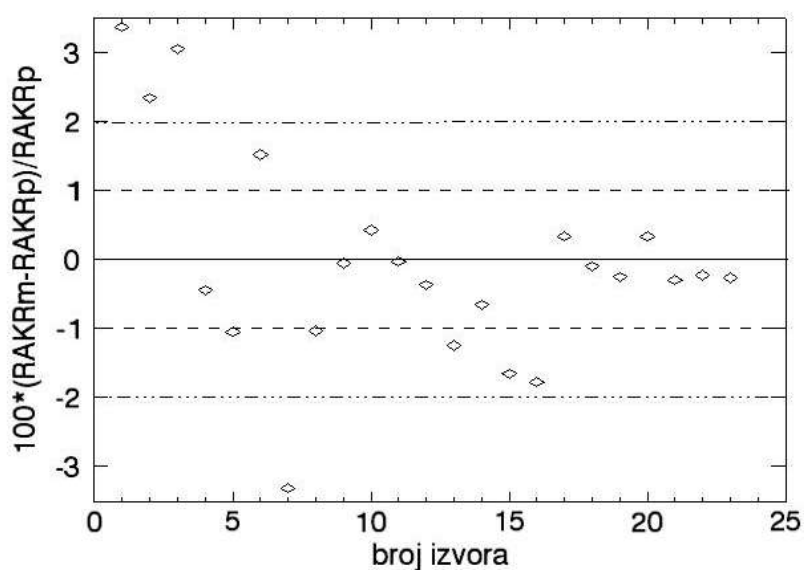
REZULTATI

Na Slici 1 su prikazani rezultati postotnih odstupanja mjerenih i proizvođačkih specifikacija *RAKR* za 23 izvora ¹⁹²Ir. Odstupanja svih mjerenja nalaze se unutar granica $\pm 3,5\%$, dok su ona za posljednjih 16 izvora unutar $\pm 2\%$. Preciznost mjerenja struje ionizacije ocijenjena je standardnom devijacijom srednje vrijednosti očitavanja ($n = 10$) tijekom nekoliko tjedana za obje komore. Ona ni u jednom slučaju nije prelazila $0,01\%$. Razlike mjerenih *RAKR* (komorama 1 i 2), za dva izvora, bile su tijekom nekoliko tjedana manje od $0,6\%$, a prema proizvođačkoj specifikaciji manje od $0,9\%$. U mjerenjima u kojima se određivala aksijalna osjetljivost komora, najveća je struja ionizacije zabilježena na 50 mm udaljenosti od njihova dna. Unutar $\pm 5\text{ mm}$ od ovog položaja izvora, mjerene struje su bile manje do $0,2\%$ od najveće zabilježene struje ionizacije.

Primjenom izraza (3) za procjenu efikasnosti sakupljanja iona u komori, odnosno rekombinacije k_r na oba polariteta, dobiven je rezultat 1,0008 za obje komore. Ti su podaci u suglasju s proizvođačkim specifikacijama.

Učinak polariteta napona napajanja, iskazan kao postotna promjena očitavanja elektrometra nakon izmjene polariteta napona napajanja komore, iznosio je 0,06 % i 0,02 % za komore 1 i 2. Konzistentni postupak kalibracije izvora osiguran je postizanjem dobre toplinske ravnoteže mjerne opreme, ranog uključivanja elektrometra prije mjerenja, predzračenja komore i uspostavom geometrijski reproducibilnih uvjeta uz minimalni utjecaj raspršenog zračenja [5,6]. Uveden je tijekom nekoliko posljednjih godina i pokazalo se da korelira s postupno smanjenom razlikom između mjerene i proizvođačke *RAKR* specifikacije izvora (Slika 1).

Kombinirana proširena nepouzdanost mjerene *RAKR* vrijednosti primjenom formalizma [4] iznosi 3,1 % uz faktor pokrivenosti $k = 2$.



Slika 1. Odstupanja mjenjenih *RAKR* ($RAKR_m$) od proizvođačkih *RAKR* ($RAKR_p$) vrijednosti 23 izvora ^{192}Ir .

Podaci iz literature o srednjim omjerima mjenjenih aktivnosti izvora ili *RAKR* vrijednosti i proizvođačkih vrijednosti, prikazani su u Tablici 2.

Tablica 2. Usporedba srednjih vrijednosti i standardnih devijacija omjera mjerenih vrijednosti aktivnosti (*) ili *RAKR* (†) izvora i proizvođačkih specifikacija. *N* je broj mjerenih izvora.

Autor	Godina	<i>N</i>	Raspon	Omjer
Ezzell* [7]	1989	29	0,961 – 1,132	1,04 ± 0,044
Venselaar* [8]	1993	16	0,958 – 1,068	1,018
Nair* [9]	1996	21	0,920 – 1,032	0,98 ± 0,03
[†] Carlsson ⁺ [10]	2008	14	0,996 – 1,026	1,01 ± 0,01
Ovaj rad ⁺	2010	23	0,969 – 1,033	1,00 ± 0,01

[†] vrijednosti u tablici su procijenjene s grafa dostupnog u navedenom radu

Rezultati mjerenja *RAKR* dobiveni u ovom radu su u veoma dobrom suglasju s rezultatima centara u kojima se niz godina provodi HDR brahiterapija. Tijekom godina su postignute sve manje vrijednosti odstupanja korisničkih od proizvođačkih kalibracija, uz smanjenje nepouzdanosti omjera. Na to su utjecali učinci poput: poboljšane konstrukcije ionizacijske komore, bolja toplinska izolacija držača komore, sistematsko otklanjanje drugih izvora nepouzdanosti u mjerenju struje ionizacije poput doprinosa raspršenog zračenja i konačno, smanjenje nepouzdanosti kalibracijskog koeficijenta izvora koja primjenom međukalibracije na temelju interpolacije [2,3], uglavnom iznosi 3 % na razini pouzdanosti od 95 % ($k = 2$). Nedavno su uspostavljeni laboratoriji koji osiguravaju primarne standarde *RAKR* veličina HDR izvora ¹⁹²Ir, s nepouzdanostima koje su usporedive s onima koje tipično susrećemo u dozimetriji vanjske radioterapije.

ZAKLJUČAK

Uz pažljivu primjenu kalibracijskog protokola temeljenog na međunarodnim preporukama i specifikacijama mjerne opreme, moguće je postići veliku točnost kalibracije izvora ¹⁹²Ir velike brzine doze. Prednosti kalibracije izvora pomoću ionizacijske komore velikog volumena očituju se u jednostavnosti i kratkoći mjerenja, te velikoj stabilnosti odziva komore. Za ispravan višegodišnji rad s ionizacijskim komorama ovog tipa potrebno je osigurati redovito kalibriranje u sekundarnom standardnom laboratoriju barem jedne komore iz Hrvatske, kako bi se njezinom usporedbom s komorama u radioterapijskim odjelima osigurala sljedivost.

LITERATURA

- [1] Venselaar J, Pérez-Calatayud J, editors. A practical guide to quality control of brachytherapy equipment: ESTRO booklet No. 8., 2004.
- [2] International Atomic Energy Agency, IAEA. Calibration of photon and beta ray sources used in brachytherapy. IAEA TECDOC-1274. Vienna: IAEA; 2002.
- [3] Goetsch SJ, Attix FH, Pearson SW, Thomadsen BR. Calibration of ^{192}Ir high-dose-rate afterloading systems. *Med Phys* 1991;18:462-467.
- [4] International Organization for Standardization, ISO. Guide to the expression of uncertainties in measurements. 1995.
- [5] Bokulić T, Budanec M, Mrčela I, Fröbe A, Kusić Z. Calibration of a Gammamed 12i Ir-192 High dose rate source. U: Garaj-Vrhovac V, Kopjar N, Miljanić S. ur. Zbornik radova Šestog simpozija Hrvatskoga društva za zaštitu od zračenja; 18-20. travnja 2005; Zagreb, Hrvatska. Zagreb: HDZZ; 2005. str. 134-39.
- [6] Podgorsak MB, DeWerd LA, Thomadsen BR, Paliwal BR. Thermal and scatter effects on the radiation sensitivity of well chambers used for high dose rate Ir-192 calibrations. *Med Phys* 1992;19:1311-4.
- [7] Ezzell, G. A. Calibration intercomparison of an Ir-192 source used for high dose rate remote afterloading. *Activity (Selectron users' News Lett.)* 1989; 3:13- 14..
- [8] Nair TKM, Cheng M, Barker A, Rouse BS. High dose rate (HDR) brachytherapy technique: For carcinoma of uterine cervix using Nucletron Applicators. *Med Dosim* 1995;20:201-207.
- [9] Venselaar JIM, Brouwer WFM, van Straaten BHM, Albers AHL. Intercomparison of calibration procedures for Ir-192 HDR sources in The Netherlands and Belgium. *Radiother Oncol* 1994;30:155-161.
- [10] Carlsson Tedgren Å, Grindborg J-E. Audit on source strength determination for HDR and PDR ^{192}Ir brachytherapy in Sweden. *Radiother Oncol* 2008; 86:126-30.

HIGH DOSE RATE ^{192}Ir SOURCE CALIBRATION: ANAYSIS OF RESULTS AND UNCERTAINTIES

*Tomislav Bokulić¹, Iva Mrčela¹, Mirjana Budanec¹, Branko Vekić²,
Ana Fröbe¹ and Zvonko Kusić¹*

¹Department of Oncology and Nuclear Medicine,
University Hospital "Sestre milosrdnice", Zagreb, Croatia

²Ruđer Bošković Institute, Zagreb, Croatia

tbokulic@kbsm.hr

A lack of primary standards for HDR ^{192}Ir brachytherapy has been known for years to cause the largest problem in obtaining lower uncertainties in *RAKR* measurements. The currently used calibration techniques where chambers are calibrated against interim standards, based on interpolation techniques, provide typically an uncertainty of $\pm 2.5\%$ ($k = 2$) in the calibration factor. It constitutes the largest contribution to the total uncertainty in *RAKR* and may be significantly reduced through the on-going development of primary standards.

In this work, *RAKR* values of 23 HDR ^{192}Ir sources were measured in the department in the past 10 years of clinical HDRBT application. All differences between the measured *RAKR* and manufacturer's specification were lower than $\pm 3.5\%$. Upon the acceptance of a more rigorous protocol, through which the different variables, such as thermal stability and geometrical reproducibility, have been better controlled during the measurement, these differences dropped to less than $\pm 2\%$. Two ionisation chambers tested in this work showed very good precision, long term stability, small polarity effect and recombination equal to the manufacturer's specification. Differences in repeated measurements of *RAKR* during the 6 weeks period, in which a source was also changed, were minimal; *RAKR*-s stayed within 1%. The calibration technique based on the re-entrant well type chamber is due to its simplicity, speed, accuracy and long term stability a highly recommended option for an institution performing HDR brachytherapy.