

β 辐射个人剂量当量 $H_p(0.07)$ 和 $H_p(3)$ 的国际比对结果

张璇^{1,2}, 黄建微¹, 李德红^{1,*}, 刘川凤¹, 张健¹, 杨智君¹, 杨扬¹

(1. 中国计量科学研究院, 北京 100029; 2. 中国疾病预防控制中心 辐射防护与核安全医学所, 北京 100088)

摘要: 为建立我国 β 辐射组织吸收剂量基准并使之达到国际等效, 中国计量科学研究院(NIM)于2019年参与了由欧洲计量组织(EURAMET)组织、德国物理技术研究院(PTB)主导的BIPM KCDB:EURAMET.RI(I)-S16比对。NIM采用 β 辐射组织吸收剂量基准装置对传递电离室进行校准, 确定了在⁸⁵Kr和⁹⁰Sr/⁹⁰Y源 β 辐射场中入射角为0°、45°、60°下 $H_p(0.07)$ 的校准因子以及⁹⁰Sr/⁹⁰Y源各角度下 $H_p(3)$ 的校准因子。比较了此次工作获得的校准因子与EURAMET提供的参考值之间的差异。9项比对结果与参考值的相对偏差均优于±1%, 比对结果已纳入国际计量局关键比对数据库(KCDB), 实现了 β 辐射个人剂量当量 $H_p(0.07)$ 和 $H_p(3)$ 量值的国际互认。

关键词: β 辐射; 个人剂量当量; 外推电离室; 国际比对; 计量

中图分类号: TL72

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2024)10-2239-06

doi: 10.7538/yzk.2023.youxian.0819

International Comparison Results of Personal Dose Equivalent $H_p(0.07)$ and $H_p(3)$ in Beta Radiation

ZHANG Xuan^{1,2}, HUANG Jianwei¹, LI Dehong^{1,*}, LIU Chuanfeng¹,

ZHANG Jian¹, YANG Zhijun¹, YANG Yang¹

(1. National Institute of Metrology, Beijing 100029, China; 2. National Institute for Radiological Protection,
Chinese Center for Disease Control and Prevention, Beijing 100088, China)

Abstract: To establish the national primary standard for beta radiation tissue absorbed dose and to achieve international equivalence, the National Institute of Metrology (NIM) of China participated in the BIPM KCDB: EURAMET.RI(I)-S16 comparison that organized by EURAMET (European Association of National Metrology Institutes) and coordinated by the Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) in 2019. The circulation of the chamber and of the electronic measurement system will be effected in a star pattern, with both devices being sent back by every five participants to the pilot laboratory for testing. 16 institutes from 16 different countries will calibrate the comparison device according to their quality system in beta reference fields of the radionuclides ¹⁴⁷Pm, ⁸⁵Kr, ⁹⁰Sr/⁹⁰Y and ¹⁰⁶Ru/¹⁰⁶Rh. NIM calibrated the transfer ionization chambers using its beta radiation tissue absorbed dose primary standard, determining the calibration factors for $H_p(0.07)$ at incident angles of 0°, 45°, and

收稿日期: 2023-11-22; 修回日期: 2024-04-07

基金项目: 中国计量科学研究院基本科研业务费(AKY1410)

* 通信作者: 李德红

60° in the radiation field of ^{85}Kr and $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ sources, as well as the calibration factors for $H_p(3)$ at various angles for the $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ source. The calibration factors obtained in this work were compared with the reference values provided by EURAMET. The relative deviations of the calibration factors for $H_p(0.07)$ at incident angles of 0°, 45°, and 60° from the $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ and ^{85}Kr sources compared to the reference values are better than $\pm 0.8\%$; The relative deviations of the calibration factors for $H_p(3)$ at incident angles of 0°, 45°, and 60° from the $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ source compared to the reference values are better than $\pm 0.9\%$. The relative deviations for the nine results are better than $\pm 1\%$. These results were incorporated into the International Bureau of Weights and Measures (BIPM) Key Comparison Database (KCDB), achieving international mutual recognition for the personal dose equivalents $H_p(0.07)$ and $H_p(3)$ in beta radiation.

Key words: beta radiation; personal dose equivalent; extrapolation chamber; international key comparison; metrology

在核医学、核燃料生产与加工环节、反应堆检修、废物处理和退役等存在 β 辐射照射的场合,工作人员的皮肤和眼晶体易受到辐射损伤^[1]。为保证辐射防护监测中个人剂量当量的准确测量,实现基本量 β 辐射组织吸收剂量的量值准确复现显得尤为重要。目前发达国家的国家计量院均建立了 β 辐射组织吸收剂量基准装置,实现了组织吸收剂量的量值复现,并进行了相关量值的传递工作^[2-4]。

各国家计量院通过参加由国际计量局(BIPM)或区域计量组织实施的比对活动,比较其测量结果与比对参考值之间的差异。通过这种方式判断这些差异是否处于比对不确定度范围内,从而作为相互承认校准和测量能力的技术基础。为保证 β 辐射个人剂量当量国际量值的等效和统一,欧洲计量组织(European Association of National Metrology Institutes, EURAMET)2004—2007年完成了首次 β 辐射0.07 mm深度的个人剂量当量比对(BIPM KCDB:EURAMET.RI(I)-S2),涵盖了8个国家计量院^[5];2018年组织了第2次 β 辐射比对(BIPM KCDB:EURAMET.RI(I)-S16),16个国家或地区参与了此次比对。因眼晶体剂量限值的大幅度降低,此次比对在 $H_p(0.07)$ 测量量基础上增加了 $H_p(3)$ 。比对的 β 放射源种类为 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 、 ^{85}Kr 、 ^{147}Pm 和 $^{106}\text{Ru}/^{106}\text{Rh}$ 。比对方式为间接比对,即参比实验室使用各自的 β 辐射组织吸收剂量基准/标准装置对德国物理技术研究院(Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB)提供的同一个电离室(6.3-Beta-FK007-02型电离室)进行校准,这种

电离室稳定可靠,可确保不同地点、不同实验室或不同系统之间进行的测量或者评估具有一致性和可比性,又称传递标准,通过比较该电离室的校准因子及其不确定度对校准和测量能力进行评估^[6]。作为主导实验室的PTB负责提供传递电离室,监督电离室在各参与实验室之间的运输情况,并分析各实验室提交的结果,编写比对总结报告。

中国计量科学研究院(NIM)基于2016年建立的 β 辐射组织吸收剂量率基准装置^[7],于2019年参加BIPM KCDB:EURAMET.RI(I)-S16比对。在 ^{85}Kr 和 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 源不同照射方向下,对传递电离室进行个人剂量当量 $H_p(0.07)$ 和 $H_p(3)$ 的校准,并将结果提交至比对主导实验室,与EURAMET提供的参考值开展比对研究。

1 实验设备与方法

1.1 实验设备

中国计量科学研究院通过外推电离室(电极之间距离可变的平行板电离室)、KEITHLEY 6517B型静电计、高精密度空气电容、温度、气压和相对湿度传感器以及数据采集系统完成 β 辐射组织吸收剂量率的量值复现,本次比对工作即在上述 β 辐射组织吸收剂量基准装置上开展。

比对测量装置由主导实验室提供的专用传递电离室和测量系统组成。其中传递电离室为6.3-Beta-FK007-02型薄窗平板电离室,其具体参数列于表1。电离室灵敏体积的中心为参考点,位于 $H_p(3)$ 测量时,电离室正面防护层表面中心下方12 mm处(图1)。

表 1 传递电离室参数^[6]
Table 1 Transfer chamber parameters^[6]

参数	数值
外部尺寸直径, mm	90
外部尺寸深度, mm	40
收集电极直径, mm	40
收集体积深度, mm	6.5
测量 $H_p(0.07)$ 的入射窗材料	石墨
组织等效窗厚度, mm	~0.07
测量 $H_p(3)$ 的额外防护层材料	PMMA
组织等效窗和防护层厚度, mm	~3
电离室高压, V	300
参考点(收集体积的中心)	PMMA 表面下 12 mm 深度

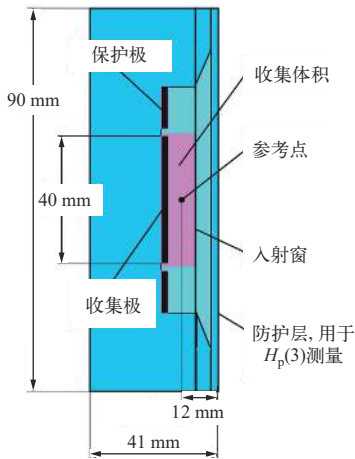


图 1 传递电离室示意图(未按比例)^[6]

Fig. 1 Sketch of transfer ionization chamber (not to scale)^[6]

1.2 实验方法

首先采用 PTW 23 392 型外推电离室测量参考位置(距放射源 30 cm)处的组织吸收剂量率, 通过下式计算得到指定入射角度、指定深度下的个人剂量当量。

$$\dot{H}_\beta = (TR - \tau_{bc}) \left(\dot{D}_t / (1 - \tau_{br}) \right) k_{de} \quad (1)$$

$$\dot{H}_{\text{光子}} = \tau_{br} \dot{D}_t / (1 - \tau_{br}) k_{de} \quad (2)$$

$$\dot{H}_p(d, \alpha) = \dot{H}_\beta + \dot{H}_{\text{光子}} \quad (3)$$

式中: $\dot{H}_p(d, \alpha)$ 为指定入射角度 α 、指定深度 d 下的个人剂量当量率; $\dot{H}_\beta$ 和 $\dot{H}_{\text{光子}}$ 分别为因 β 辐射和光子(韧致辐射)所致的个人剂量当量率; T 为深度修正因子, 单位为 Sv/Gy, 当 $d=0.07$ mm 时, $T=1$; R 为某深度指定入射角的角度修正因子; τ_{br} 为光子(韧致辐射)剂量与总剂量的比值; k_{de} 为 β 放射源衰变的修正因子。

将传递电离室放置在距放射源 30 cm 位置处进行校准。为减少电离室无法完全对称(如电离室的入射窗和石墨层厚度的微小差异)的影响, 在入射角的正、负两个角度方向(如 $\pm 45^\circ$ 、 $\pm 60^\circ$)分别进行校准, 两次结果的平均值作为该辐射质下的校准因子。计算公式如下:

$$N_{\text{pos}} = \frac{\dot{H}_p(d, \alpha)_{\text{pos}}}{I(d)_{\text{ch, pos}}} \quad (4)$$

$$N_{\text{neg}} = \frac{\dot{H}_p(d, \alpha)_{\text{neg}}}{I(d)_{\text{ch, neg}}} \quad (5)$$

$$N = \frac{N_{\text{pos}} + N_{\text{neg}}}{2} \quad (6)$$

式中: N 为传递电离室的校准因子; $\dot{H}_p(d, \alpha)_{\text{pos}}$ 和 $\dot{H}_p(d, \alpha)_{\text{neg}}$ 分别为正方向和负方向、指定入射角度 α 、指定深度 d 下的个人剂量当量率; $I(d)_{\text{ch, pos}}$ 为传递电离室的电离电流。

2 修正项及比对结果

量值复现得到基于 ^{85}Kr 和 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 放射源在展平过滤器条件下, 距离放射源 30 cm 处的组织吸收剂量率列于表 2。

表 2 基于 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 和 ^{85}Kr 源的组织吸收剂量率
Table 2 Tissue absorbed dose rate based on $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ and ^{85}Kr sources

物理量	数值	
	$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	^{85}Kr
深度 l , mm	2.2	0.95
电流 I_{mean} , pA	0.842 9	1.623 5
$\frac{d}{dl}(kI_{\text{mean}})$, pA/mm	0.226 2	0.638 2
修正因子 k'	1.048 2	1.072 6
组织吸收剂量率, mGy/h	37.3	108.6
不确定度 $U_{\text{rel}}(k=2)$, %	2.5	2.4

注: 参考日期为 2016 年 12 月 12 日

依据 ISO 6980.3《核能-参考 β 粒子辐射 第 3 部分: 场所和个人剂量计的校准及其对 β 辐射能量和入射角的响应的测定》^[8] 和文献 ^[9] 得到各角度和深度下的修正因子(表 3)。

传递电离室在 ^{85}Kr 和 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 放射源展平过滤器条件下, 距离源 30 cm 处的 $H_p(0.07)$ 和 $H_p(3)$ 的校准因子结果以及参考值分别列于表 4~6。由于

表3 NIM标准的各项修正因子结果

Table 3 Correction factor and conversion coefficient for NIM standard

物理量	$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 量值	$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 量值相对标准不确定度/%	^{85}Kr 量值	^{85}Kr 量值相对标准不确定度/%
$T_{0.07}$, Sv/Gy	1.0	0.0	1.0	0.0
T_3 , Sv/Gy	0.431 1	0.51		
$R_{0.07,0^\circ}$	1.00	0.00	1.00	0.00
$R_{0.07,45^\circ}$	1.12	1.17	0.88	1.17
$R_{0.07,60^\circ}$	1.14	2.00	0.72	2.00
$R_{3,0^\circ}$	1.00	0.0		
$R_{3,45^\circ}$	0.472	1.76		
$R_{3,60^\circ}$	0.228	3.0		
k_{dc}	0.943 2	0.01	0.854	0.01
τ_{br}	0.000 62	0.02	0.000 25	0.01

表4 不同入射角下 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 源传递电离室 $H_p(0.07)$ 的校准结果Table 4 Calibration results of $H_p(0.07)$ for $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ source transfer ionization chamber at different incident angles

量	入射角 0° 的量值		入射角 45° 的量值		入射角 60° 的量值	
	量值	$U^{(1)}$	量值	$U^{(1)}$	量值	$U^{(1)}$
$\dot{H}_p(0.07, \alpha)$, mSv/h	35.2	0.9	39.4	1.4	40.1	1.9
I_{ch} , fA	2 356	9	2 400	13	2 074	11
N , $10^{13}\text{mSv}/(\text{h}\cdot\text{A})$	1.492	0.038	1.641	0.057	1.934	0.092
N_R , $10^{13}\text{mSv}/(\text{h}\cdot\text{A})$	1.493	0.024	1.641	0.031	1.927	0.043

注: 1) U 为不确定度, $k=2$ 表5 不同入射角下 ^{85}Kr 源传递电离室 $H_p(0.07)$ 的校准结果Table 5 Calibration results of $H_p(0.07)$ for ^{85}Kr source transfer ionization chamber at different incident angles

量	入射角 0° 的量值		入射角 45° 的量值		入射角 60° 的量值	
	量值	$U^{(1)}$	量值	$U^{(1)}$	量值	$U^{(1)}$
$\dot{H}_p(0.07, \alpha)$, mSv/h	92.8	2.2	81.7	2.7	66.8	3.1
I_{ch} , fA	5 627	21	4 574	24	3 481	19
N , $10^{13}\text{mSv}/(\text{h}\cdot\text{A})$	1.649	0.040	1.786	0.060	1.920	0.090
N_R , $10^{13}\text{mSv}/(\text{h}\cdot\text{A})$	1.651	0.027	1.774	0.036	1.905	0.045

注: 1) U 为不确定度, $k=2$ 表6 不同入射角下 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 源传递电离室 $H_p(3)$ 的校准结果Table 6 Calibration results of $H_p(3)$ for $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ source transfer ionization chamber at different incident angles

物理量	入射角 0° 的量值		入射角 45° 的量值		入射角 60° 的量值	
	量值	$U^{(1)}$	量值	$U^{(1)}$	量值	$U^{(1)}$
$\dot{H}_p(3, \alpha)$, mSv/h	15.16	0.42	7.15	0.32	3.46	0.23
I_{ch} , fA	918.8	3.8	402.0	3.2	178.2	3.0
N , $10^{13}\text{mSv}/(\text{h}\cdot\text{A})$	1.650	0.045	1.783	0.080	1.948	0.130
N_R , $10^{13}\text{mSv}/(\text{h}\cdot\text{A})$	1.650	0.032	1.796	0.046	1.965	0.059

注: 1) U 为不确定度, $k=2$

采用同一电离室测量正角度和负角度的个人剂量当量,因此这两个量是直接相关的,在进行校准因子的不确定度评定时,考虑了这两个量之间的相关性。

主导实验室将各参比实验室测量得到的校准因子的加权平均值作为参考值 N_R , N_R 被用于确定各参比实验室的等效程度。NIM提交的校准因子与参考值 N_R 的相对偏差示于图2~4, $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 源 0° 、 45° 和 60° 角度条件下NIM的 $H_p(0.07)$ 校准因子与参考值的相对偏差分别为 -0.067% 、 0.000% 、 0.363% ; ^{85}Kr 源各角度条件下NIM的 $H_p(0.07)$ 校准因子与参考值的相对偏差分别为 -0.121% 、 0.676% 、 0.787% ; $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 源 0° 、 45° 和 60° 角度条件下NIM的 $H_p(3)$ 的校准因子与参考值的相对偏差分别为 0.000% 、 -0.724% 、 -0.865% 。随着角度的

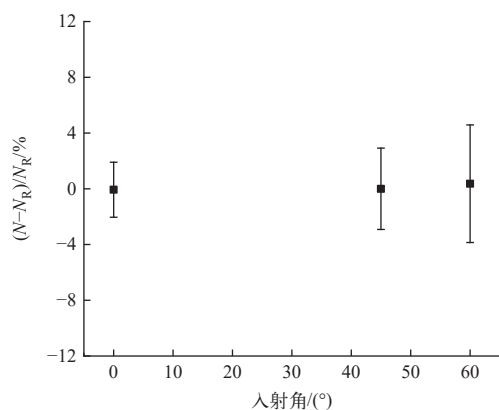


图2 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 源条件下 $H_p(0.07)$ 校准因子NIM-EURAMET比对结果

Fig. 2 Calibration factor NIM-EURAMET comparison results for $H_p(0.07)$ under $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ source conditions

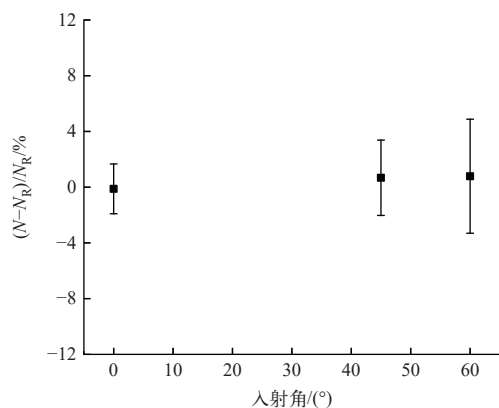


图3 ^{85}Kr 源条件下 $H_p(0.07)$ 校准因子NIM-EURAMET比对结果

Fig. 3 Calibration factor NIM-EURAMET comparison results for $H_p(0.07)$ under ^{85}Kr source conditions

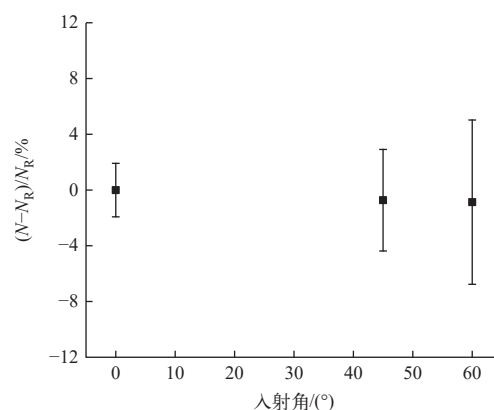


图4 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 源条件下 $H_p(3)$ 校准因子NIM-EURAMET比对结果

Fig. 4 Calibration factor NIM-EURAMET comparison results for $H_p(3)$ under $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ source conditions

增加,其相对偏差不确定度逐渐增大。其因为某一深度不同指定入射角的角度修正因子不确定度随角度增加而增大。

3 结论

2019年中国计量科学研究院参与了BIPM KCDB:EURAMET.RI(I)-S16比对工作。 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 源和 ^{85}Kr 源 0° 、 45° 和 60° 入射角下 $H_p(0.07)$ 校准因子与参考值的相对偏差优于 $\pm 0.8\%$; $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 源 0° 、 45° 和 60° 入射角下 $H_p(3)$ 校准因子与参考值的相对偏差优于 $\pm 0.9\%$,均优于 $\pm 1\%$,该结果获得了国际等效,并纳入BIPM关键比对数据库(key comparison database, KCDB)^[10-11]。 β 辐射个人剂量当量 $H_p(0.07)$ 和 $H_p(3)$ 的国际比对结果表明,中国计量科学研究院建立的 β 辐射组织吸收剂量测量装置所复现的量值其准确度达到了国际先进水平,该结果为 β 辐射组织吸收剂量国家基准的建立奠定了基础。

参考文献:

- [1] 李景云. 肢端剂量计和核设施弱贯穿辐射(主要是 β 辐射)的辐射防护监测[J]. 辐射防护, 2003, 23(5): 300-307, 314.
LI Jingyun. Extremity dosimeter and radiation protection monitoring in nuclear installations for weakly penetrating radiation, especially beta radiation[J]. Radialization Protection, 2003, 23(5): 300-307, 314(in Chinese).
- [2] BAKSHI A K, VANDANA S, PALANI SELVAM T, et al. Measurement of the output of ISO recommended beta sources with an extrapolation chamber[J]. Radiation Mea-

- surements, 2013, 53/54: 50-55.
- [3] BEHRENS R. Correction factors for two new reference beta radiation fields[J]. *Metrologia*, 2020, 57(6): 065005.
- [4] CATSCD OR, BOHM J, SCHNEIDER M. Determination of absorbed dose rates with air-filled extrapolation chamber dimensions or low gas pressures[J]. *Radiological protection*, 1982, 24: 1-190.
- [5] BEHRENS R, HELMSTÄDTER K, AMBROSI P, et al. International comparison EUROMET. RI(I)-S2 of extrapolation chamber measurements of the absorbed dose rate in tissue for beta radiation (EUROMET Project No. 739): Final report[J]. *Metrologia*, 2007, 44(1A): 06003.
- [6] BEHRENS R. Technical Protocol: EURAMET supplementary comparison of personal dose equivalent at 0.07 mm and 3 mm depth, $H_p(0.07)$ and $H_p(3)$, for beta radiation[R]. [S. 1.]: Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), 2019.
- [7] 黄建微, 张璇, 李德红, 等. 基于 β 放射源的组织吸收剂量的量值复现[J]. *计量学报*, 2023, 44(9): 1444-1450. HUANG Jianwei, ZHANG Xuan, LI Dehong, et al. Reproduction of tissue absorbed dose based on beta radiation source[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2023, 44(9): 1444-1450(in Chinese).
- [8] International Organization for Standardization. Nuclear energy: Reference beta-particle radiation, Part 3: Calibration of area and personal dosimeters and the determination of their response as a function of beta radiation energy and angle of incidence: ISO 6980.3-2019[R]. Geneva: ISO, 2019.
- [9] BEHRENS R, BUCHHOLZ G. Extensions to the beta secondary standard BSS 2[J]. *Journal of Instrumentation*, 2011, 6(11): P11007.
- [10] Bureau International des Poids et Mesures, BIPM. EURAMET. RI(I)-S16[DB/OL]. (2023-10-31)[2023-11-11]. <https://www.bipm.org/kcdb/comparison?id=452>.
- [11] European Association of National Metrology Institutes, EURAMET. Comparison of personal dose equivalent at 0.07 mm and 3 mm depth, $H_p(0.07)$ and $H_p(3)$, for beta radiation[DB/OL]. (2023-10-31)[2023-11-11]. https://www.euramet.org/technical-committees/tc-projects/details/?tx_euramettcp_project%5bproject%5d=1399&tx_euramettcp_project%5bcontroller%5d.