

空气中 ^{222}Rn 的累积测量法

中国医学科学院放射医学研究所 姜会侠 郭秋菊综述 张景源审

提要: 本文介绍累积测量室内氡气浓度的热释光法、径迹蚀刻法和活性炭吸附法。除概括了各种方法的探测原理、探测器的结构外,还对各种探测器的刻度、探测下限,及影响探测结果可靠性的各种因素进行了讨论。

放射性氡气及其子体对人体健康的影响,近年来引起人们的极大关注。矿山的流行病学调查资料显示,矿工的超额肺癌发病率与长期受氡气及其子体暴露之间有密切联系。为进行流行病学研究,为查明长期受氡气暴露和肺癌发病之间的关系,首先需要有准确、可靠、适于大规模调查使用的氡气浓度测量方法。本文介绍几种氡气的累积浓度探测技术,以供参考。

一、热释光法

热释光氡气累积监测器是借助对电离辐射灵敏的热释光元件实现对氡气探测的装置。瑞典Studsvik Energiteknik AB的氡测量仪^[1](Radon Measuring instrument, RM-1)、加拿大原子能局的被动氡积分监测器^[2](Passive Radon Integrating Monitor, PRIM)、美国纽约大学医学中心的环境 γ 射线及 ^{222}Rn 探测器^[3](Environmental Gamma-ray and ^{222}Rn Detector, EGARD)和美国EPA使用的被动环境氡监测器^[4](Passive Environmental Radon Monitors, PERMs)是几种典型的这类监测器。

(一)物理结构及探测元件

这类探测器通常由一个体积为1~2升的方形或圆形氡气收集室构成^[1,3],在一侧或双侧装有由塑料泡沫制成的过滤窗,氡气可通过扩散进入室内。在室内至少布有两个TL探测元件,其中一个TL元件密封在塑

料小盒内或用铝箔包裹,另一个则置于通以负高压的镀铝塑料薄膜或由乙烯-丙烯氟化特弗隆制成的驻极体后面。使用的高压在-1000V左右,TL元件为0.38mm厚的 $\text{CaSO}_4:\text{Dy}^{[4]}$, $\text{CaF}_2:\text{Dy}^{[8]}$ 或 LiF (TLD-100) 压片。

(二)探测原理

氡气收集室过滤窗的作用在于阻止氡子体或其它固态放射性物质进入。氡气经扩散进入收集室,并不断形成大部分荷正电的 ^{218}Po 离子,这些新形成的 ^{218}Po 子体有相当一部分在电场作用下被收集在探测元件前面的薄膜上,因而它们放出的 α 粒子可被TL元件探测。另外,一个未被荷负电薄膜包绕的TL元件,则只能探测 γ 射线和宇宙射线。暴露后的TL元件经TLD读数仪测量后,便可由二者之差按刻度系数求出暴露期间的平均氡浓度。

(三)监测器的刻度^[2,3]

把装有探测元件的监测器暴露在湿度、温度和氡浓度恒定的氡气暴露室一段时间后,便可根据TL读数、氡浓度和暴露时间求出刻度系数。假定暴露室氡浓度为 $R(\text{Bq}/\text{m}^3)$, TLD读数减去本底后为 $A(\text{nC})$, 暴露时间为 $t(\text{d})$, 则刻度系数为

$$F = Rt/A \quad (\text{Bq} \cdot \text{d} \cdot \text{m}^{-3}/\text{nC})$$

这样,将经过暴露的TLD读数乘以刻度系数 F 和除以暴露时间 t 后,即可求出平均氡浓度值。

(四)方法的可靠性及影响因素

TL氡监测仪的刻度系数 F 值取决于监测器的构型和其他使用条件,可从几十至几百 $\text{Bq}\cdot\text{d}\cdot\text{m}^{-3}/\text{nC}$ 。 RM-1 的探测精度,当暴露水平为 $1500\text{Bq}\cdot\text{d}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,为 $\pm 5\sim 10\%$ (SD),EGARD的探测下限约为 $3700\text{Bq}\cdot\text{d}\cdot\text{m}^{-3}$ (α 和 β 值均为0.05)〔3〕。暴露时间可从数周至数月,假定暴露时间为一年,则氡浓度探测下限为 $10\text{Bq}/\text{m}^3$ 。PERMs由于使用商品级的热释光元件TLD-100 (LiF)和Harshaw公司生产的2000型TLD读数仪而改善了探测灵敏度,暴露一周的95%置信水平的探测下限为 $11\text{Bq}/\text{m}^3$ 。这类探测器对湿度不很敏感,当相对湿度在10~80%之间变化时,几乎对效率没有影响,但相对湿度过高或过低会影响探测结果。有人观察〔3〕,在 25°C ,相对湿度近于100%条件下暴露五周,可导致刻度系数降低80%。在实际使用条件下不会出现如此长时间高湿度的条件。TLD在较高温度下放置会出现衰退现象〔5〕,在监测器收集室内布放事先经标准 γ 射线源照射的同类TL元件,可观察和评价在特定监测环境下是否有这一现象发生及其严重程度〔3〕。

此外,由于TL元件对 γ 射线和宇宙射线亦敏感,因此当环境本底高时,会降低氡暴露读数在总读数中的份数,增加氡测定的误差。

二、径迹蚀刻法

有一类称之为固体核径迹探测器的塑料薄膜,在 α 粒子入射时,会引起沿入射途径上的化学键断裂而留下径迹〔6〕,这种径迹可经化学和电化学方法处理后被放大,从而能用显微镜或缩微胶片阅读器等进行径迹读数。当这种材料制成的探测器暴露在含氡气环境中,最终记录的径迹数目与暴露时间和氡气浓度呈线性关系,因而可用来测定暴露期间的平均氡水平。

(一)探测元件

用作 α 粒子探测器的这类材料主要有两大类〔7〕:(1)硝酸纤维素(CN)。代表性的产品有Kodak公司的LR-115〔8~10〕,类似的产品尚有CA-80-15和CN85。LR-115Ⅱ型核径迹薄膜厚度为 $12\mu\text{m}$,呈红色或透明,贴敷在一层较厚的透明支持薄片上〔9〕。(2)聚碳酸酯塑料。代表性的产品为英国Pershore Mouldings公司生产的CR-39〔7〕。类似的产品有Tuffak和Makrofol〔11〕。这类薄膜生产的厚度自 $0.3\sim 0.6\text{mm}$ 〔11~13〕,使用的尺寸可按要求随意裁剪。CR-39较坚硬,蚀刻后亦很光亮,对 α 辐射要比CN敏感,能记录所有能量的天然 α 粒子,因而对沉积其表面的氡子体亦有响应。而CN则只能对能量低于4 MeV的 α 粒子响应。此外,CR-39的本底坑点比CN薄膜的要小,其灵敏度和均匀性不随时间改变,因而越来越多地采用CR-39。其缺点是各批产品之间,各片之间,甚至同一片不同处对射线响应的不均匀性。

(二)探测器的构型、种类及工作原理

径迹蚀刻被动氡探测器大致有裸型〔8、9〕,杯型〔7、12、14、15〕及静电收集型〔10、16〕。裸型探测器是把 $1\times 4\text{cm}$ 大小的CN薄膜用长50cm的绳子吊在距墙壁1~2 m远的天花板或吊灯上。裸型探测器记录空气中的氡气及子体放射出的 α 粒子,所以当室内氡子体平衡度有较大变化时,会给结果带来一定误差。但该方法简单、易行、经济,故适于大规模调查使用。芬兰和瑞典在全国性室内氡水平调查中都使用了这种方法。杯型探测器是把探测元件放入一定尺寸的杯型容器内,在杯子的顶端安装玻璃纤维滤膜或高渗透膜或加上以聚乙烯衬里的盖子,目的在于只允许氡气扩散进入杯内,此外过滤膜还可大大降低 ^{220}Rn 对 ^{222}Rn 测定结果的影响。例如,当杯内外氡气交换速率为 0.75h^{-1} 时,杯内 ^{220}Rn 浓度会降至外部的2%,而 ^{222}Rn 的浓度可达杯外的98%,故

对 ^{222}Rn 测定结果几乎无影响^[10]。Urban等学者还研究了杯(或称扩散室)的体积和几何尺寸、探测元件在杯内的位置、杯的构成材料及各种滤膜对探测灵敏度的影响^[12]。静电收集型探测器是一类结构稍复杂的氡探测装置。在一个体积大约1.5升的圆柱型不锈钢盒上部的两侧装有两个直径为20mm的微孔滤膜(0.3 μm ~1.2 μm)，顶部中央有一用电池加至-180或-270V的电极，电极中央有一深10mm、直径24mm的凹陷部分，用以安放CN薄膜，电极表面盖一层0.9mg/cm²厚的铝箔，在不锈钢盒底部放有用20号金属网包裹的150gP₂O₅。当氡气经扩散进入收集室后，新形成的荷正电 ^{218}Po 在电场作用下被收集在铝箔上，CN探测元件则选择性地记录 ^{218}Po 的 α 粒子。这类探测器的灵敏度较高，可用于室外氡水平的测量。缺点是结构较复杂，需要使用干电池和干燥器，而且比较笨重(重量约为3kg)，邮寄不大方便。

(三)探测器的刻度及灵敏度

由于裸型探测器记录的 α 粒子来自 ^{222}Rn 及其子体，因此，在刻度时需知道氡与子体的平衡度。假定氡浓度为C， ^{218}Po 和 ^{214}Po 的浓度分别为 f_1C 和 f_3C ，CN薄膜对各核素的探测效率为 k_i ，则单位时间内单位面积上记录的径迹数 $t = (k_0 + k_1f_1 + k_3f_3)C$ ，假定 $k_0 = k_1 = k_3 = k$ ，并将 $1 + f_1 + f_3$ 写成FK，并令 $K_f = 1/(kFK)$ ，则 $C = K_ft$ ， K_f 即为平衡系数为F时的刻度系数。当居民室内平均平衡系数为0.446时，FK值为2.04，此时的刻度系数可按刻度测量时的刻度系数 $K_f[k_{0.446} = K_f(FK/2.04)]$ 求出。mäkeläinen^[8]在7次刻度中求出的刻度系数的加权平均值为 $20.0 \pm 2.4(\text{SD})\text{Bq} \cdot \text{d} \cdot \text{m}^{-3}/(\text{径迹} \cdot \text{cm}^{-2})$ 或 $50 \pm 6\text{径迹} \cdot \text{cm}^{-2}/(\text{kBq} \cdot \text{d} \cdot \text{m}^{-3})$ 。假定CN本底值 $\beta B = 0.2\text{径迹}/\text{mm}^2$ ，计数面积为 $A = 19.32\text{mm}^2$ ^[17]，按上述刻度系数可由 $\sigma\beta \approx \frac{\sqrt{\beta BA}}{\Delta F}$ 求出本底值的不确定度为

(F为刻度系数) $203\text{Bq} \cdot \text{d} \cdot \text{m}^{-3}$ ，于是探测下限 $\text{LLD} = 4.66\sigma\beta = 950\text{Bq} \cdot \text{d} \cdot \text{m}^{-3}$ ，暴露三个月的探测下限为 $10\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 。由于裸型探测器是将探测元件直接暴露在空气中，探测结果除受径迹蚀刻法共有的不确定因素影响外，还受氡子体平衡度影响，其他 α 发射体也可能有些影响。因此，测定误差要比其他类型径迹探测器大些。

杯型和静电型探测器的刻度简单些。在氡气浓度已知的暴露室内暴露一段时间后，即可根据暴露时间、氡浓度和记录的径迹数求出刻度系数。LR-115通常由厂家给出平均径迹记录效率，单位为径迹 $\text{mm}^{-2}/(\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d})$ ，其数值为0.0017^[17]，不同批号的产品这一数值可能有所不同。当读数面积 17.25mm^2 ，本底值0.2径迹/ mm^2 时，其探测下限为 $280\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}$ 。日本学者研制的静电探测器的平均刻度系数为 $0.052 \pm 0.002(\text{SD})\text{径迹} \cdot \text{cm}^{-2}/(\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h})$ ，暴露二周的探测下限LLD为 $1.2\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 。各作者使用的探测器构型不一样，操作程序亦有所不同，因此，方法的灵敏度可能有较大差异。

(四)蚀刻及计数

暴露后的探测元件，需经过化学或化学加电化学蚀刻，使径迹尺寸增大后才能计数。化学蚀刻是使用碱性溶液在一定温度下浸泡数小时来实现的，各作者使用的蚀刻溶液、温度和时间列于下表。有些人采用第一步化学蚀刻0.5~1h后，再向蚀刻溶液中的电极通以800~1000V的2kHz交变电压2~3h^[1,12]来完成电化学蚀刻过程。化学蚀刻配以电化学蚀刻的优点是径迹尺寸要更大些，因此计数可在单视野下进行。

径迹计数一般使用放大倍数为十倍至数百倍的缩微胶片阅读器或光学显微镜进行。加拿大的McGregor等人^[7]把一台Artek 800型的克隆计数器通过TV摄像机与一台Nikon Apophot型显微镜(150 \times)相连接来实现计数；意大利的Venuti等人^[13]曾试

表 蚀刻条件的比较

溶 液	温度	时间	探测元件	文献	备注
2.5N NaOH	60°C	3 h	CN	[10]	
6.25N NaOH	70°C	8 h	CR-39	[13]	
15% KOH + 40% 乙醇 + 45% 水	60°C	1 h	Tuffak	[11]	加电化蚀刻
30% KOH	70°C	9 h	CR-39	[14]	
20% 6 N KOH 80% 乙醇	室温	0.5 h	Mokrofal	[12]	加电化蚀刻
20% NaOH	80°C	16 h	CR-39	[7]	

验过二种自动径迹计数系统,即:自动干扰影像分析仪(Interactive Automatic Image Analyser, IBAS)和精密译码及图象识别系统(Precision Encoding and Pattern Recognition, PEPR, system),试图建立大量探测器的快速、省力和可再现的读数方法。

(五)方法的不肯定度

径迹蚀刻方法包括探测元件、暴露、蚀刻、计数等几个环节,每一环节都可能引入误差,影响测定结果的准度和精度。首先,各种探测元件都有其固有的灵敏度和本底坑点,这种特性在同一种探测元件的不同批号,甚至同一批内不同片之间可能会有很大不同。本底坑点经蚀刻后与射线径迹无区别,同样被记录下来。Randle等人[11]发现聚碳酸酯塑料Tuffak经蚀刻后,在 25×25 mm面积上记录到5~50个“无剂量”径迹,这种“无剂量”径迹的不肯定性明显影响方法的灵敏度。有人认为[7],这可能是生产时包裹探测元件的聚乙烯包膜上的胶粘剂变质所致。附着在探测材料上的胶粘剂污点会形成径迹并且当受到高热和光照时径迹尺寸增大,因此,需很好保护探测材料免受光照和过热。本底径迹亦可通过事先加热探测材料至 135°C , 3 h,使其退火来消除[11]。暴露过程中同样会引入一些误差,例如氦子体平衡度的变化会影响裸型探测器的探测准度[8]。过高的湿度可能对氦子体的静电收

集有影响[18],滤膜安装不良造成的氦子体进入探测杯会引起刻度系数的变化[17]。径迹蚀刻溶液浓度和温度、蚀刻时间的变化均会影响径迹的尺寸,即影响能计数到的径迹数目。不同操作员计数误差亦不容忽视,每一径迹计数员应单独进行刻度[8]。径迹计数服从泊松分布,当总计数很少时误差会很大[4]。Nelson[17]的研究表明,在环境氦水平的测量中,平均变异系数大约为20%左右,测量结果的误差平均为计数统计误差的二倍。

三、活性炭法

活性炭法是一种利用活性炭在现场累积收集氦几天之后,在实验室通过NaI探头测量氦子体特有 γ 谱峰来计算暴露期间空气中平均氦浓度的一种方法。这种方法简便、易行、价廉,适于大规模调查应用,很受欢迎。

(一)氦气收集器

收集器由一个塑料的或金属制成的小盒及盛装的活性炭组成。盒的尺寸不等,一般深度为3~5 cm,任天山等人[18]使用直径7 cm,深度5 cm,装85g活性炭的塑料盒;George[19]最初使用经改装的M II军用滤毒罐,盛装150g活性炭,炭床厚度约3 cm,面积 87cm^2 ,后来改用高度5 cm,面积 80cm^2 的金属盒盛装200g活性炭,炭床高4.5 cm;Cohn[20]等人则使用直径7.62 cm,高度2.54 cm的市售油膏盒装25g活性炭。一般使用尺寸为12~30孔的椰子果制成的活性炭,有人对20来种活性炭吸附氦效果研究表明[21],除某些质量很差外,未发现有特殊好的活性炭。盒的暴露面积可按探头尺寸及对灵敏度的要求而定,但炭床的深度以不超过3 cm为宜。对于暴露时间为 T_1 (秒),炭床的最佳深度 $h(\text{cm})$ 可按 $h \approx \sqrt{DT_1}$ 大致计算出来[22]。式中 D 为氦气扩散常数,取 $D = 1.86 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}$ 。活性炭表面加金属网固定,金属网再用弹性环或胶合剂固定在盒内,以保

持炭的相对位置不变。炭盒在用前经120℃烘烤数小时或过夜,赶出吸附的氡气,然后加盖,并用胶带密封,直至暴露开始打开,暴露后再密封。最新式样的设计是Cohn的扩散栅活性炭吸附收集器(Diffusion Barrier Charcoal Adsorption Collectors, DBCA)^[20],作者根据活性炭吸附氡气的理论和实践,设计并制造了这一新式的氡收集装置,其结构为:在直径7.62cm、高2.54cm的商品油膏盒内装大小为12×300的椰子果活性炭25g(碳床高1.5cm),活性炭表面加一层金属网,并用胶粘剂固定在盒的壁上。盒盖上打一直径1.9cm的圆孔,在两侧贴有二层孔径为0.0054cm的尼龙筛网,在盒盖的孔上再加一装有3g干燥剂的小袋。每次使用前,将盖取下,在120℃烘烤过夜,驱除氡气,然后加盖,用胶带密封,而扩散栅(尼龙网和干燥袋)则用铝箔盖上,并用胶带密封。暴露时揭开铝箔,结束时再封严。作者详尽地讨论了这一设计的基础,可参考原文。

(二)工作原理

活性炭为一种孔隙多,表面积大的活性吸附材料,在范德华分子引力作用下,氡气可被吸附在活性炭上。假定P为氡气的分压,k为吸附系数,则单位质量活性炭吸附的氡气体积V可按亨利定律 $V=kP$ 计算^[23]。取室温下氡的吸附系数 $k=4000\text{cm}^3/\text{g}$,则在平衡状态下,每克炭吸附4升空气中存在的氡气,若氡浓度为1Bq/升,则每克炭吸附4Bq的氡气^[22]。亦可将吸附系数以放射性单位表示,即 $k=4000\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1}\text{炭}/\text{Bq}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。因此,在平衡条件下,m克活性炭吸附的空气浓度为 C_0 的氡气量 $Q=k m C_0$ ^[20]。Q值可用已刻度的仪器测量,代入公式,即可求出暴露期间的氡浓度。实际使用时是按刻度系数计算氡浓度。

(三)刻度

不同的收集和测量装置有不同的刻度系

数,必须对每一套装置和操作条件进行单独刻度。温度和湿度会影响刻度系数,因此需在一定的湿度、温度条件下进行刻度,并求出这些因素对刻度系数影响的幅度,以便在实际使用时进行校正。一般刻度程序是将预处理的活性炭盒放入氡气浓度和温度、湿度均恒定的氡气暴露室内一段时间后,取出封存,至少三小时后,在与多道谱仪连系的NaI探头上测量特征 γ 谱峰。假定测得的净计数率为N(cpm),探测系统对刻度的炭盒计数率为E(cpm/Bq),暴露时间为Ts(min),自暴露中点至计数开始的衰变系数为DF,暴露期间的氡浓度为 $R_n(\text{Bq/L})$,则刻度系数 $CF[\text{Bqmin}^{-1}/(\text{BqL}^{-1})=\text{L/min}]$ 可按下式求出: $CF=N/(E\cdot Ts\cdot DF\cdot R_n)$ 。George^[19]对其装置在温度为23℃和相对湿度为50%条件下进行刻度,得出暴露三天的刻度系数为 $0.042\pm 0.003\text{L/min}$ 。

活性炭法的探测下限取决于炭盒尺寸、测量装置的特性及其它因素,暴露四天的探测下限为 $3.7\sim 7.2\text{Bq/m}^3$ ^[24]。

(四)测量^[19,20,23]

活性炭盒暴露结束经至少三小时密封,使氡与其短寿命子体达到平衡后,在连于多道谱仪的NaI探头上测量氡子体的特征 γ 谱峰。测量探头多用 $8\text{cm}\times 8\text{cm}$ 的NaI(TL)晶体,谱仪系统只要有几百道就足够用。探测的特征 γ 谱峰为 ^{214}Pb 的242keV,294keV,352keV和 ^{214}Bi 的609keV γ 射线的全吸收峰。测量时间5~30分。Cohn^[20]将测量谱峰分为220~390keV和550~680keV两个能区。炭盒暴露在 37Bq/m^3 一周后,经3.8天后测量30分钟,在这二个能区测得的总计数分别为200和60,本底计数分别为1200和400左右,标准偏差为17%。

(五)影响因素

活性炭法测氡的准确性受暴露时温度、湿度和氡浓度变化及其发生的时相的影响。温度和湿度的增高都会降低活性炭对氡的吸

附量, 温度的校正系数大约为每华氏度 15%^[25]。但有人在 18°~27℃ 温度范围内进行刻度试验, 未发现装置在响应上有明显差异^[19], 温度校正比较困难, 只能靠用户对温度的估计。湿度的影响可通过向炭盒内加入如硅胶等干燥剂来降低, 准确的校正方法是称量暴露前后炭盒的重量, 用增加的重量校正湿度影响^[23、25]。刻度是在氡浓度恒定条件下进行的, 因而暴露期间氡浓度的短时间变化, 可能会对结果有很大影响。由于活性炭吸附氡具有吸附和解吸附二个过程, 氡的半衰期只有 3.8 天, 因此越接近暴露结束时, 吸附的氡对结果的贡献越大。暴露期间氡浓度短时间变化出现的时相, 即离暴露结束时间的远近, 会对测量结果有很大影响。为了减少这种影响, Cohen 设计一种所谓扩散栅活性炭吸附收集器——DBCA^[20], 这种装置的结构前面已经介绍。由于安装了扩散栅, 尽管灵敏度受到一定影响, 但对氡气的收集更具有时间积分性, 而且扩散栅本身具有阻止和吸收水分的本领, 大大减少了湿度对测定结果的影响。这种装置已进入商品应用阶段^[26]。

上面介绍的三种氡浓度监测方法, 均各有其优点和不足之处, 需根据监测目的和规模、氡的浓度、已有的设备条件和经费考虑选用。

参 考 文 献

1. Tovedal H; Radiat Protect Dosimet 1984, 7 : 215
2. Washington RA, et al; Health Phys 1983, 45 : 559
3. Maiello ML, et al; Health Phys 1987, 53 : 301
4. Nyberg PC, et al; Health Phys 1983, 45 : 539
5. Brits RJN, et al; Radiat Protect Dosimet 1984, 7 : 219
6. Young DA; Nature 1958, 182 : 375
7. McGregor RG, et al; Experiences in the

Development of A CR-39 Alpha Track Dosimeter for Radon, Presented at "Indoor radon II" Specialty Conference, Air Pollution Control Association, Cherry Hill, New Jersey, April 6~10, 1987

8. Makelainen I; Radiat Protect Dosimet 1984, 7 : 195
9. Jonsson G; Health Phys 1988, 54 : 271
10. Iida T, et al; Health Phys 1988, 54 : 139
11. Randle MW, et al; Radiat Protect Dosimet 1987, 19 : 29
12. Urban M; Radiat Protect Dosimet 1981, 1 : 97
13. Venuti GC, et al; Radiat Protect Dosimet 1984, 7 : 271
14. Abu-Jarad F, et al; Health Phys 1984, 46 : 1126
15. Fleischer RL, et al; Health Phys 1983, 45 : 409
16. Ikebe Y, et al; Health Phys 1985, 49 : 992
17. Nelson RA; Health Phys 1987, 53 : 447
18. 林莲卿等; 辐射防护 1986, 1 : 1
19. George AC; Health Phys 1984, 46 : 867
20. Cohen BL, et al; Health Phys 1986, 50 : 457
21. Cohen BL, et al; Health Phys 1987, 52 : S70 (suppl) abstract
22. Cohen BL, et al; Health Phys 1983, 45 : 501
23. Gustafsson J, et al; Radiat Protect Dosimet 1984, 7 : 203
24. George AC; Instruments and Methods for Measuring Indoor Radon and Radon Progeny Concentrations, In Proceedings of the Specialty Conference on Indoor Radon, Air Pollution Control Assoc. Philadelphia, Pennsylvania February 1986. SP-54 (APCA)
25. Cohen BL; Health Phys 1986, 50 : 828
26. Cohen BL; Health Phys 1987, 53 : 198