

# 应急情况下放射性核素的 $\gamma$ 能谱快速分析方法

Rapid analysis method of radionuclides by gamma spectrometry under emergency

2018 - 06 - 15 发布

2018 - 12 - 01 实施

中华人民共和国国家卫生健康委员会 发布

## 目 次

前言 .....	II
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 仪器和设备 .....	1
5 样品采集 .....	2
6 样品预处理 .....	3
7 $\gamma$ 能谱仪的刻度 .....	5
8 样品测量 .....	5
9 质量控制 .....	5
10 结果报告 .....	6
附录 A (资料性附录) 应急响应中可能涉及的放射性核素 .....	7
附录 B (资料性附录) 核电站可能释放的放射性核素 .....	13
附录 C (资料性附录) 应急时样品的测量时间与典型放射性核素的最小可探测活度浓度 .....	14
参考文献 .....	15

## 前 言

本标准按照GB/T 1.1—2009给出的规则起草。

本标准由国家卫生标准委员会放射卫生标准专业委员会提出。

本标准起草单位：中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所、清华大学、军事医学科学院放射与辐射医学研究所、山东省医学科学院放射医学研究所、新疆维吾尔自治区疾病预防控制中心。

本标准主要起草人：拓飞、周强、侯长松、赵兰才、曾志、杨宝路、杨国山、李则书、朱茂祥、袁龙、邓大平、王玉文、张京、许家昂、李文红。

# 应急情况下放射性核素的 $\gamma$ 能谱快速分析方法

## 1 范围

本标准规定了应急情况下样品放射性核素 $\gamma$ 能谱仪快速分析方法。

本标准适用于应急状态、紧急事件或在短时间内定性识别原始样品中的 $\gamma$ 放射性核素种类以及定量分析样品中 $\gamma$ 放射性核素活度浓度。

## 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 5750.2 生活饮用水标准检验方法 水样的采集与保存

GB/T 11713 高纯锗 $\gamma$ 能谱分析通用方法

WS/T 184 空气中放射性核素的 $\gamma$ 能谱分析方法

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**应急** emergency

需要迅速采取行动缓解对人体健康和安全、生活质量、财产或环境的危害或不利后果的非常规情况。

### 3.2

**应急监测** emergency monitoring

在应急情况下，为发现或查明人员和场所放射性污染情况或辐射水平而进行的辐射监测。

## 4 仪器和设备

### 4.1 称量设备

分析天平，或可精确到0.1 g的电子秤。

### 4.2 样品盒

测量所用的样品盒材质、尺寸和容量应与效率刻度所用的样品盒相同。应急情况下优先选用圆柱型样品盒或与探测器尺寸相匹配的马林杯型样品盒。

### 4.3 样品粉碎摇匀装置

样品粉碎摇匀装置包括研杵、切刀、食品加工机等常用的切碎、粉碎摇匀用具。

#### 4.4 高纯锗（HPGe） $\gamma$ 能谱仪测量分析系统

高纯锗（HPGe） $\gamma$ 能谱仪测量分析系统，能量响应应覆盖在40 keV~2 000 keV之间，具体可用的能量范围由能量刻度和效率刻度决定。高纯锗（HPGe） $\gamma$ 能谱仪测量分析系统的进一步使用方法和具体配置见标准GB/T 11713。

#### 4.5 标准源

标准源指已知放射性核素活度浓度的标准样品。包括能量刻度标准源和效率刻度标准源。它发射的 $\gamma$ 射线能量要能覆盖应急情况下关注核素的能量范围，已知放射性核素的活度浓度应溯源到国家基准，应急响应中可能涉及的放射性核素参见附录A，核电站可能释放的放射性核素参见附录B。

#### 4.6 无源效率刻度软件

无源效率刻度软件是通过计算机模拟方法得到能量与效率之间关系曲线的软件。无源效率刻度软件包含所用探测器的特有表征参数，并且能与谱分析软件结合使用。使用无源效率刻度软件时需用实际标准源进行验证。

### 5 样品采集

#### 5.1 样品采集原则

5.1.1 采样人员应做好个人防护，避免受到放射性污染。

5.1.2 应急情况时监测采样地点应考虑当地气象条件，在预测污染最高浓度处、主导下风向以及人口密集区进行适当加密布点。

5.1.3 样品采集前应首先对采集地周边 $\gamma$ 辐射水平进行巡测并做好记录，必要时可进行表面污染检测，以确定放射性污染影响范围及程度，重点采集位于污染水平较高区域的样品。

5.1.4 采集的样品应双份标识及编号，详细记录采样人员、采样日期和时间、采样量、采样地点（经纬度坐标）等信息。

5.1.5 采集的食品和饮用水样品应具有代表性。结合采样季节和当地膳食结构，优先考虑露天生长的食品。

5.1.6 样品采集所用的方法和工具不能对待测样品造成污染和使得待测核素损失。如果样品采集容器需要重复使用，则应注意避免交叉污染。

5.1.7 应急期间，原则上应每日对食品或饮用水进行放射性监测。食品或饮用水的采样量一般应不少于鲜重5 kg或5 L。

#### 5.2 空气

空气样品借助于空气采样泵把空气中气载微粒样品收集到滤膜上，收集空气中气态放射性碘时，可采用吸附盒或特殊处理过的化学吸收剂，详细采集方法见WS/T 184。

#### 5.3 降水

在应急期间，预期或已有降雨或降雪时，应及时收集雨水或雪水样品。降水采集装置宜安放在周围半径30 m没有树木和建筑物遮挡的平坦、开阔的地面，收集装置距地面高1 m。在降暴雨情况下，应及时收集初期降雨。收集的雪样，应移至室内，使其自然融化。

#### 5.4 土壤

采集最有可能被放射性核素污染到的表层土壤，采集深度为0 cm~5 cm；采集的地点优先选择平坦、开阔的地面；采样量约为2 kg~3 kg；一般在10 m×10 m范围内，采用五点法采集样品。

#### 5.5 牧草

采集牧草样品时，要从露出土壤根茎部以上剪下，以避免土壤污染。

#### 5.6 食品

##### 5.6.1 奶类

奶类样品应在奶站、农户或对动物直接采样，并记录动物饲料信息。

##### 5.6.2 蔬菜和水果

在放射性沉降阶段，应采集露天种植的蔬菜和水果。采样时，注意避免土壤的污染。

##### 5.6.3 谷物和薯类

如遇收获季节，直接采集种植区的谷物和薯类。已包装成袋的，可用粮库通用的采样器扎入袋内取样。

##### 5.6.4 肉类

肉类样品最好在当地饲养场的屠宰场采集，并记录动物的饲料信息。

##### 5.6.5 海产品

海产品样品直接从近海养殖场采集或从渔业公司购买确知捕捞海域的海产品，对养殖场的海产品要记录饲料信息。

#### 5.7 水

包括生活饮用水、地表水和海水。生活饮用水的采集按照GB/T 5750.2的规定。地表水和海水采样参照GB/T 5750.2水源水的采集执行。

#### 5.8 其他类样品

残骸、瓦砾、废渣、建材等其他类样品的采集结合应急情况下的现场实际情况处理，对送检样品，按送检记录登记即可。

### 6 样品预处理

#### 6.1 预处理原则

应急情况下样品的预处理应本着快速、科学的原则，经简单处理后装样测量。其样品测量的几何条件应尽量与效率刻度标准源保持一致。按照监测采样是为了评价受到放射性污染程度，还是评价食入途径所致剂量等不同目的，结合当地食用习惯，选择对食品样品清洗或不清洗，去皮或不去皮等，并在结果报告中注明。

#### 6.2 空气

从取样器中取出滤料，折叠平放于样品盒内，并且压实、固定加盖密封后直接测量。

### 6.3 土壤

去除石块、杂草等异物后，直接装满样品盒测量，同时预留100 g左右的土壤样品用于测量干湿比。

### 6.4 牧草

去除砂石、泥土和根，将其剪碎成长1 cm ~2 cm的小段后，装满样品盒测量。

### 6.5 食品

#### 6.5.1 奶类

奶类样品可直接装样测量。

#### 6.5.2 蔬菜

蔬菜类样品去除不可食的根、茎、叶及腐烂部分，将样品加工成小于1 cm<sup>3</sup>的几何尺寸后装满样品盒测量。

#### 6.5.3 水果

水果类样品，应加工成小于1 cm<sup>3</sup>的几何尺寸后装满样品盒测量。

#### 6.5.4 谷类

谷类样品去除沙粒和灰尘等杂物后，直接装满样品盒测量。

#### 6.5.5 薯类

薯类样品去除泥沙、腐烂部分后，通过切、粉碎等手段，将样品加工成小于1 cm<sup>3</sup>的几何尺寸后装满样品盒测量。

#### 6.5.6 肉类及海产品

取可食部分，将其切成小于1 cm<sup>3</sup>的几何尺寸后装满样品盒测量。

### 6.6 水

每升样品中加入10 mL浓度为11 mol/L的盐酸或硝酸进行酸化后直接装满样品盒测量。

### 6.7 其他类样品

残骸、瓦砾、废渣、建材、食品干燥剂等样品，粉碎、研磨后通过50目筛孔过筛，装样测量。其他样品，包括环境沉降灰、擦拭样品、消费品、衣物和特殊的物品（如宝石、玉石、木艺、工艺品、手表等）等，如无特别要求，无需进行破坏性预处理，可进行简单防污染密封整理后直接放入测量腔体进行测量。

## 7 $\gamma$ 能谱仪的刻度

### 7.1 能量刻度

将能量刻度标准源置于探测器适当位置，采用谱分析软件获得全能峰峰位，确定峰位和能量之间的关系，应急情况下能量刻度标准源可借助已知核素种类的效率刻度标准源，或用铅室天然本底核素进行快速能量校核。

## 7.2 效率刻度

### 7.2.1 有源效率刻度

有源效率刻度方法按照GB/T 11713执行，应在日常情况下提前完成并存储，应急情况下快速校核后直接调用。

### 7.2.2 无源效率刻度

应急情况下可采用无源效率刻度软件或基于蒙特卡罗模拟技术的方法进行效率的快速模拟。无源效率刻度软件在应用前，需对几种常见介质（如水、土壤等）的样品进行有源效率刻度值和无源效率刻度值的比较，当已知能量段效率值的最大相对偏差不超过15%时即可应用。

## 8 样品测量

### 8.1 测量原则

应急情况下根据需要可进行定性识别和定量测量。对于定性识别，可进一步简化样品预处理流程。在能量刻度完成后，只要能准确识别出待测核素即可快速报告核素种类。

应急情况下的测量时间与样品中典型放射性核素的最小可探测活度浓度参见附录C。具体的测量时间可根据 $\gamma$ 能谱仪的探测效率、本底、样品中放射性核素的活度和应急工作需要适当调整。

### 8.2 测量方法

8.2.1 为了防止探测器受到污染，用聚乙烯袋将待测样品包裹起来。

8.2.2 将待测的样品置于探测器上进行测量，待测样品在探测器的位置应与效率刻度标准源的一致。

8.2.3 根据全能峰的能量进行核素鉴别。测量结束时，应校验能量刻度，保证核素鉴别可靠。

8.2.4 调用已存储好的探测效率值确定样品中 $\gamma$ 放射性核素的水平；对于不规则尺寸的样品形状，可结合无源效率刻度软件进行效率模拟。

8.2.5 样品中放射性核素的定量计算及结果的不确定度评定可参见GB/T 11713。

8.2.6 在测量开始和结束时，应测量仪器的本底谱，防止因探测器污染造成测量结果的不准确。

## 9 质量控制

### 9.1 日常维护

#### 9.1.1 仪器检定或校准测试

用于测量分析的相关设备（如高纯锗 $\gamma$ 能谱仪等）需经过国家法定计量部门检定或校准，且在有效期内进行使用。

#### 9.1.2 复测

为了检查样品的分析精度，应适时重复测量样品，计算两个结果之间的重复错误率（*DER*），其计算如式（1）所示：



$$DER = \frac{|AC_{\text{original}} - AC_{\text{dup}}|}{\sqrt{u_c^2(AC_{\text{original}}) + u_c^2(AC_{\text{dup}})}} \dots\dots\dots (1)$$

式中:

$AC_{\text{original}}$  ——初测样品中某核素的活度浓度,单位为贝可每千克(Bq/kg),或贝可每升(Bq/L),或毫贝可每立方米(mBq/m<sup>3</sup>);

$AC_{\text{dup}}$  ——复测样品中某核素的活度浓度,单位为贝可每千克(Bq/kg),或贝可每升(Bq/L),或毫贝可每立方米(mBq/m<sup>3</sup>);

$u_c(AC_{\text{original}})$  ——初测样品中某核素的扩展不确定度,单位为贝可每千克(Bq/kg),或贝可每升(Bq/L),或毫贝可每立方米(mBq/m<sup>3</sup>);

$u_c(AC_{\text{dup}})$  ——复测样品中某核素的扩展不确定度,单位为贝可每千克(Bq/kg),或贝可每升(Bq/L),或毫贝可每立方米(mBq/m<sup>3</sup>)。

$DER$  的值应小于或等于3。如果样品的复测值不在这个限值内,则该批样品需要重测,或适当的时候给予解释说明。对测量结果低于探测下限的样品,复测检验结果也应一致。

## 9.2 应急情况下质量控制

### 9.2.1 仪器校核

应急情况下,仪器在测量样品前,应用标准源进行校核。

### 9.2.2 样品复测

应急情况下,在完成一批样品检测后,可抽样重复测量,并计算 $DER$ ,判定该批样品检测结果是否可靠。

## 10 结果报告

10.1 报告样品分析结果应清晰简明,同时给出适当说明。

10.2 除定性识别不用给出报告结果的单位外,其他定量报告应使用国际单位制(SI)单位和符号,一些标准单位推荐如下:空气:mBq/m<sup>3</sup>,水和牛奶等液体:Bq/L,土壤和牧草:Bq/kg(干重或鲜重),食品:Bq/kg(干重或鲜重)。

10.3 定量分析时,应给出核素的测量结果及其扩展不确定度,并注明扩展不确定度置信度。扩展不确定度一般保留1位有效数字,当扩展不确定度首位小于“3”,可保留2位有效数字;测量结果的有效数字,应根据测量结果的最后一位和不确定度的末位对齐的原则确定。

10.4 在低水平活度测量时,当低于探测下限时应给出探测下限,并适当注明测量条件,如谱仪系统主要性能、测量时间、使用特征峰、测量几何条件等。

附 录 A  
(资料性附录)  
应急响应中可能涉及的放射性核素

应急响应中可能涉及的放射性核素见表A.1。

表A.1 应急响应中可能涉及的放射性核素

核素	$\gamma$ 射线能量 keV	$\gamma$ 射线分支比	半衰期 d
Ac-227	100	$3.17 \times 10^{-4}$	$7.96 \times 10^3$
Ac-227	83.96	$2.21 \times 10^{-4}$	$7.96 \times 10^3$
Ag-110m	657.75	$9.47 \times 10^{-1}$	$2.50 \times 10^2$
Ag-110m	884.67	$7.29 \times 10^{-1}$	$2.50 \times 10^2$
Am-241	59.54	$3.63 \times 10^{-1}$	$1.58 \times 10^5$
Am-242m	49.3	$1.90 \times 10^{-3}$	$5.55 \times 10^4$
Am-243	74.67	$6.60 \times 10^{-1}$	$2.70 \times 10^6$
Au-198	411.80	$9.55 \times 10^{-1}$	$2.70 \times 10^0$
Au-198	70.82	$1.38 \times 10^{-2}$	$2.70 \times 10^0$
Ba-133	30.97	$6.29 \times 10^{-1}$	$3.91 \times 10^3$
Ba-133	355.86	$6.23 \times 10^{-1}$	$3.91 \times 10^3$
Ba-137m	661.62	$9.00 \times 10^{-1}$	$1.77 \times 10^{-3}$
Ba-137m	32.19	$3.82 \times 10^{-2}$	$1.77 \times 10^{-3}$
Ba-140	537.38	$1.99 \times 10^{-1}$	$1.28 \times 10^1$
Ba-140	29.96	$1.43 \times 10^{-1}$	$1.28 \times 10^1$
Bi-207	569.67	$9.80 \times 10^{-1}$	$1.39 \times 10^4$
Bi-207	1063.62	$7.70 \times 10^{-1}$	$1.39 \times 10^4$
Cd-109	24.95	$1.43 \times 10^{-1}$	$4.53 \times 10^2$
Cd-113m	263.7	$6.00 \times 10^{-5}$	$5.33 \times 10^3$
Cd-113m	23.17	$6.00 \times 10^{-5}$	$5.33 \times 10^3$
Ce-141	145.45	$4.80 \times 10^{-1}$	$3.24 \times 10^1$
Ce-141	36.03	$8.88 \times 10^{-2}$	$3.24 \times 10^1$
Ce-143	293.3	$4.34 \times 10^{-1}$	$1.40 \times 10^0$
Ce-143	36.03	$3.23 \times 10^{-1}$	$1.40 \times 10^0$
Ce-144	133.53	$1.08 \times 10^{-1}$	$2.84 \times 10^2$
Ce-144	36.03	$4.80 \times 10^{-2}$	$2.84 \times 10^2$
Cf-252	43.4	$1.30 \times 10^{-4}$	$8.99 \times 10^2$
Cm-242	44.03	$3.25 \times 10^{-4}$	$1.63 \times 10^2$
Cm-243	103.75	$2.08 \times 10^{-1}$	$1.04 \times 10^4$
Cm-244	42.82	$2.55 \times 10^{-4}$	$6.61 \times 10^3$

表A.1 (续)

核素	$\gamma$ 射线能量 keV	$\gamma$ 射线分支比	半衰期 d
Cm-245	103.76	$2.30 \times 10^{-1}$	$3.11 \times 10^6$
Co-58	810.75	$9.95 \times 10^{-1}$	$7.08 \times 10^1$
Co-58	511	$3.00 \times 10^{-1}$	$7.08 \times 10^1$
Co-60	1332.51	$1.00 \times 10^0$	$1.93 \times 10^3$
Co-60	1173.23	$9.99 \times 10^{-1}$	$1.93 \times 10^3$
Co-60	2158.7	$8.00 \times 10^{-6}$	$1.93 \times 10^3$
Cr-51	320.07	$9.83 \times 10^{-2}$	$2.77 \times 10^1$
Cs-134	604.66	$9.76 \times 10^{-1}$	$7.53 \times 10^2$
Cs-134	795.76	$8.54 \times 10^{-1}$	$7.53 \times 10^2$
Cs-136	818.5	$1.00 \times 10^0$	$1.30 \times 10^1$
Cs-136	1048.07	$8.00 \times 10^{-1}$	$1.30 \times 10^1$
Cs-137	661.62	$8.46 \times 10^{-1}$	$1.10 \times 10^4$
Cs-137	32.19	$3.70 \times 10^{-2}$	$1.10 \times 10^4$
Eu-152	40.12	$3.00 \times 10^{-1}$	$4.64 \times 10^3$
Eu-152	121.78	$2.92 \times 10^{-1}$	$4.64 \times 10^3$
Eu-154	123.1	$4.05 \times 10^{-1}$	$3.11 \times 10^3$
Eu-154	1274.8	$3.55 \times 10^{-1}$	$3.11 \times 10^3$
Eu-155	86.45	$3.27 \times 10^{-1}$	$1.81 \times 10^3$
Eu-155	105.31	$2.18 \times 10^{-1}$	$1.81 \times 10^3$
Fe-59	1099.22	$5.65 \times 10^{-1}$	$4.51 \times 10^1$
Fe-59	1291.56	$4.32 \times 10^{-1}$	$4.51 \times 10^1$
Gd-153	41.54	$6.00 \times 10^{-1}$	$2.42 \times 10^2$
Gd-153	40.9	$3.20 \times 10^{-1}$	$2.42 \times 10^2$
Hf-181	482.16	$8.60 \times 10^{-1}$	$4.25 \times 10^1$
Hf-181	133.05	$4.30 \times 10^{-1}$	$4.25 \times 10^1$
Hg-203	279.17	$8.15 \times 10^{-1}$	$4.66 \times 10^1$
Hg-203	72.87	$6.40 \times 10^{-2}$	$4.66 \times 10^1$
Ho-166m	184.41	$7.39 \times 10^{-1}$	$4.38 \times 10^5$
Ho-166m	810.31	$5.97 \times 10^{-1}$	$4.38 \times 10^5$
I-125	27.47	$7.30 \times 10^{-1}$	$6.01 \times 10^1$
I-125	27.2	$3.92 \times 10^{-1}$	$6.01 \times 10^1$
I-129	29.78	$3.60 \times 10^{-1}$	$5.73 \times 10^9$
I-129	29.46	$1.90 \times 10^{-1}$	$5.73 \times 10^9$
I-131	364.48	$8.12 \times 10^{-1}$	$8.04 \times 10^0$
I-131	636.97	$7.27 \times 10^{-2}$	$8.04 \times 10^0$
I-131	284.29	$6.06 \times 10^{-2}$	$8.04 \times 10^0$
I-131	80.18	$2.62 \times 10^{-2}$	$8.04 \times 10^0$
I-131	29.78	$2.59 \times 10^{-2}$	$8.04 \times 10^0$

表A.1 (续)

核素	$\gamma$ 射线能量 keV	$\gamma$ 射线分支比	半衰期 d
I-132	667.69	$9.87 \times 10^{-1}$	$9.92 \times 10^{-2}$
I-132	772.61	$7.62 \times 10^{-1}$	$9.92 \times 10^{-2}$
In-114m	24.21	$2.00 \times 10^{-1}$	$4.95 \times 10^1$
In-114m	189.9	$1.77 \times 10^{-1}$	$4.95 \times 10^1$
Ir-192	316.49	$8.70 \times 10^{-1}$	$7.40 \times 10^1$
Ir-192	468.06	$5.18 \times 10^{-1}$	$7.40 \times 10^1$
K-40	1460.75	$1.07 \times 10^{-1}$	$4.68 \times 10^{11}$
La-140	1596.2	$9.55 \times 10^{-1}$	$1.68 \times 10^0$
La-140	487.03	$4.30 \times 10^{-1}$	$1.68 \times 10^0$
Mn-54	834.81	$1.00 \times 10^0$	$3.12 \times 10^2$
Mo-99	140.51	$9.09 \times 10^{-1}$	$2.76 \times 10^0$
Mo-99	739.47	$1.30 \times 10^{-1}$	$2.76 \times 10^0$
Na-22	511	$1.80 \times 10^0$	$9.50 \times 10^2$
Na-22	1274.54	$9.99 \times 10^{-1}$	$9.50 \times 10^2$
Nb-94	871.1	$1.00 \times 10^0$	$7.42 \times 10^6$
Nb-94	702.5	$1.00 \times 10^0$	$7.42 \times 10^6$
Nb-95	765.82	$9.90 \times 10^{-1}$	$3.52 \times 10^1$
Nd-147	91.1	$2.83 \times 10^{-1}$	$1.11 \times 10^1$
Nd-147	38.72	$2.30 \times 10^{-1}$	$1.11 \times 10^1$
Nd-147	531	$1.35 \times 10^{-1}$	$1.11 \times 10^1$
Np-237	86.49	$1.31 \times 10^{-1}$	$7.82 \times 10^8$
Np-237	29.38	$9.80 \times 10^{-2}$	$7.82 \times 10^8$
Np-237	95.87	$2.96 \times 10^{-2}$	$7.82 \times 10^8$
Np-239	103.7	$2.40 \times 10^{-1}$	$2.36 \times 10^0$
Np-239	106.13	$2.27 \times 10^{-1}$	$2.36 \times 10^0$
Pa-234m	1001.03	$5.90 \times 10^{-3}$	$8.13 \times 10^{-4}$
Pa-234m	766.6	$2.07 \times 10^{-3}$	$8.13 \times 10^{-4}$
Pb-210	46.52	$4.00 \times 10^{-2}$	$7.45 \times 10^3$
Pm-145	37.36	$3.86 \times 10^{-1}$	$6.47 \times 10^3$
Pm-145	36.85	$2.11 \times 10^{-1}$	$6.47 \times 10^3$
Pm-147	121.2	$4.00 \times 10^{-5}$	$9.58 \times 10^2$
Pm-149	285.9	$3.10 \times 10^{-2}$	$2.21 \times 10^0$
Pm-149	859.4	$1.00 \times 10^{-3}$	$2.21 \times 10^0$
Pm-151	340.08	$2.24 \times 10^{-1}$	$1.18 \times 10^0$
Pm-151	40.12	$1.66 \times 10^{-1}$	$1.18 \times 10^0$
Po-210	803	$1.10 \times 10^{-5}$	$1.38 \times 10^2$
Pr-144	696.49	$1.49 \times 10^{-2}$	$1.20 \times 10^{-2}$
Pr-144	2185.61	$7.70 \times 10^{-3}$	$1.20 \times 10^{-2}$

表A.1 (续)

核素	$\gamma$ 射线能量 keV	$\gamma$ 射线分支比	半衰期 d
Pu-236	47.6	$6.90 \times 10^{-4}$	$1.04 \times 10^3$
Pu-236	109	$1.20 \times 10^{-4}$	$1.04 \times 10^3$
Pu-238	43.45	$3.80 \times 10^{-4}$	$3.21 \times 10^4$
Pu-238	99.86	$7.24 \times 10^{-5}$	$3.21 \times 10^4$
Pu-239	51.62	$2.08 \times 10^{-4}$	$8.81 \times 10^6$
Pu-239	129.28	$6.20 \times 10^{-5}$	$8.81 \times 10^6$
Pu-240	45.24	$4.50 \times 10^{-4}$	$2.39 \times 10^6$
Pu-240	104.23	$7.00 \times 10^{-5}$	$2.39 \times 10^6$
Pu-241	98.44	$2.20 \times 10^{-5}$	$5.54 \times 10^3$
Pu-241	94.66	$1.20 \times 10^{-5}$	$5.54 \times 10^3$
Pu-241	111	$8.40 \times 10^{-6}$	$5.54 \times 10^3$
Pu-242	44.7	$3.60 \times 10^{-2}$	$1.41 \times 10^8$
Pu-242	103.5	$7.80 \times 10^{-3}$	$1.41 \times 10^8$
Ra-226	185.99	$3.28 \times 10^{-2}$	$5.84 \times 10^5$
Ra-226	83.78	$3.10 \times 10^{-3}$	$5.84 \times 10^5$
Rb-86	1076.63	$8.76 \times 10^{-2}$	$1.86 \times 10^1$
Rh-106	511.8	$2.06 \times 10^{-1}$	$3.46 \times 10^{-4}$
Rh-106	621.8	$9.81 \times 10^{-2}$	$3.46 \times 10^{-4}$
Ru-103	497.08	$8.64 \times 10^{-1}$	$3.94 \times 10^1$
Ru-103	610.33	$5.30 \times 10^{-2}$	$3.94 \times 10^1$
Sb-124	602.71	$9.81 \times 10^{-1}$	$6.02 \times 10^1$
Sb-124	1691.04	$5.00 \times 10^{-1}$	$6.02 \times 10^1$
Sb-126	695.1	$9.97 \times 10^{-1}$	$1.25 \times 10^1$
Sb-126	666.2	$9.97 \times 10^{-1}$	$1.25 \times 10^1$
Sb-127	685.5	$3.57 \times 10^{-1}$	$3.85 \times 10^0$
Sb-127	473	$2.50 \times 10^{-1}$	$3.85 \times 10^0$
Sc-46	1120.52	$1.00 \times 10^0$	$8.39 \times 10^1$
Sc-46	889.26	$1.00 \times 10^0$	$8.39 \times 10^1$
Se-75	264.65	$5.86 \times 10^{-1}$	$1.20 \times 10^2$
Se-75	136	$5.60 \times 10^{-1}$	$1.20 \times 10^2$
Sn-113	391.71	$6.42 \times 10^{-1}$	$1.15 \times 10^2$
Sn-113	24.21	$3.90 \times 10^{-1}$	$1.15 \times 10^2$
Sn-123	1089	$6.00 \times 10^{-3}$	$1.29 \times 10^2$
Sn-123	1032	$4.00 \times 10^{-4}$	$1.29 \times 10^2$
Sn-125	1066.6	$9.00 \times 10^{-2}$	$9.62 \times 10^0$
Sn-125	915.5	$4.25 \times 10^{-2}$	$9.62 \times 10^0$
Sn-126	87.57	$3.75 \times 10^{-1}$	$3.65 \times 10^7$
Sn-126	26.11	$1.89 \times 10^{-1}$	$3.65 \times 10^7$

表A.1 (续)

核素	$\gamma$ 射线能量 keV	$\gamma$ 射线分支比	半衰期 d
Sr-89	909.2	$9.50 \times 10^{-4}$	$5.05 \times 10^1$
Ta-182	67.75	$4.13 \times 10^{-1}$	$1.15 \times 10^2$
Ta-182	1121.28	$3.50 \times 10^{-1}$	$1.15 \times 10^2$
Tb-160	876.37	$3.00 \times 10^{-1}$	$7.21 \times 10^1$
Tb-160	298.57	$2.74 \times 10^{-1}$	$7.21 \times 10^1$
Tc-99	89.6	$6.50 \times 10^{-6}$	$7.82 \times 10^7$
Te-127	417.9	$9.93 \times 10^{-3}$	$3.90 \times 10^{-1}$
Te-127	360.3	$1.35 \times 10^{-3}$	$3.90 \times 10^{-1}$
Te-129	27.77	$1.64 \times 10^{-1}$	$4.83 \times 10^{-2}$
Te-129	459.5	$7.14 \times 10^{-2}$	$4.83 \times 10^{-2}$
Te-129m	27.47	$1.53 \times 10^{-1}$	$3.36 \times 10^1$
Te-129m	27.2	$7.80 \times 10^{-2}$	$3.36 \times 10^1$
Te-131m	773.67	$3.81 \times 10^{-1}$	$1.25 \times 10^0$
Te-131m	852.21	$2.06 \times 10^{-1}$	$1.25 \times 10^0$
Te-132	228.16	$8.85 \times 10^{-1}$	$3.25 \times 10^0$
Te-132	28.5	$5.40 \times 10^{-1}$	$3.25 \times 10^0$
Th-227	236	$1.12 \times 10^{-1}$	$1.85 \times 10^1$
Th-227	50.2	$8.50 \times 10^{-2}$	$1.85 \times 10^1$
Th-227	256.25	$6.80 \times 10^{-2}$	$1.85 \times 10^1$
Ti-44	78.4	$9.47 \times 10^{-1}$	$1.73 \times 10^4$
Ti-44	67.8	$8.77 \times 10^{-1}$	$1.73 \times 10^4$
Tl-204	70.82	$7.40 \times 10^{-3}$	$1.38 \times 10^3$
Tl-204	68.89	$4.00 \times 10^{-3}$	$1.38 \times 10^3$
Tm-170	84.26	$1.00 \times 10^{-1}$	$1.29 \times 10^2$
Tm-170	52.39	$6.80 \times 10^{-2}$	$1.29 \times 10^2$
Tm-170	51.35	$3.60 \times 10^{-2}$	$1.29 \times 10^2$
U-235	185.72	$5.40 \times 10^{-1}$	$2.57 \times 10^{11}$
U-235	143.76	$1.05 \times 10^{-1}$	$2.57 \times 10^{11}$
U-235	163.35	$4.70 \times 10^{-2}$	$2.57 \times 10^{11}$
U-238	48	$7.50 \times 10^{-4}$	$1.72 \times 10^{12}$
V-48	983.5	$1.00 \times 10^0$	$1.61 \times 10^1$
V-48	1311.6	$9.80 \times 10^{-1}$	$1.61 \times 10^1$
V-48	511	$9.80 \times 10^{-1}$	$1.61 \times 10^1$
W-187	685.74	$2.92 \times 10^{-1}$	$9.96 \times 10^{-1}$
W-187	479.57	$2.34 \times 10^{-1}$	$9.96 \times 10^{-1}$
Y-90	1760.7	$1.15 \times 10^{-4}$	$2.67 \times 10^0$
Y-91	1204.9	$3.00 \times 10^{-3}$	$5.85 \times 10^1$
Yb-169	50.74	$7.81 \times 10^{-1}$	$3.07 \times 10^1$

表A.1 (续)

核素	$\gamma$ 射线能量 keV	$\gamma$ 射线分支比	半衰期 d
Yb-169	63.12	$4.50 \times 10^{-1}$	$3.07 \times 10^1$
Yb-169	49.77	$4.22 \times 10^{-1}$	$3.07 \times 10^1$
Zn-65	1115.52	$5.08 \times 10^{-1}$	$2.44 \times 10^2$
Zn-65	511	$2.83 \times 10^{-2}$	$2.44 \times 10^2$
Zr-95	756.72	$5.48 \times 10^{-1}$	$6.44 \times 10^1$
Zr-95	724.18	$4.42 \times 10^{-1}$	$6.44 \times 10^1$

注：表中数据取自ASTM D7784—12。

附 录 B  
(资料性附录)  
核电站可能释放的放射性核素

B.1 核电站可能释放的惰性气体核素见表B.1。

表 B.1 核电站可能释放的惰性气体核素

核素	半衰期	核素	半衰期
Ar-41	109.34 min	Xe-133	5.24 d
Kr-85	10.75 a	Xe-133m	2.19 d
Kr-85m	4.48 h	Xe-135	9.14 h
Kr-87	76.3 min	Xe-135m	15.29 min
Kr-88	2.84 h	Xe-137	3.82 min
Kr-89	3.15 min	Xe-138	14.1 min
Xe-131m	11.8 d	—	—

注：表中数据取自IAEA Safety Reports Series No.64, Programmes and Systems for Source and Environmental Radiation Monitoring, 2010。

B.2 核电站可能释放的 $\gamma$ 放射性核素见表B.2。

表 B.2 核电站可能释放的  $\gamma$  放射性核素

核素	半衰期	核素	半衰期
Cr-51	27.7 d	Ru-106	373.6 d
Mn-54	312.3 d	Ag-110m	249.8 d
Co-57	271.8 d	Sb-124	60.2 d
Co-58	70.86 d	I-131	8.02 d
Fe-59	44.5 d	Cs-134	2.065 a
Co-60	5.27 a	Cs-137	30.07 a
Zn-65	244.26 d	Ba-140	12.75 d
Zr-95	64.02 d	La-140	1.68 d
Nb-95	34.97 d	Ce-141	32.5 d
Ru-103	39.26 d	Ce-144	284.9 d

注：表中数据取自IAEA Safety Reports Series No.64, Programmes and Systems for Source and Environmental Radiation Monitoring, 2010。



附 录 C  
(资料性附录)

应急时样品的测量时间与典型放射性核素的最小可探测活度浓度

C.1 应急时马林杯样品盒(2L)样品的测量时间与最小可探测活度浓度见表C.1。

表 C.1 应急时马林杯样品盒(2L)样品的测量时间与最小可探测活度浓度

样品名称	样品量	I-131测量时间				Cs-137测量时间				单位
		10 min	30 min	1 h	10 h	10 min	30 min	1 h	10 h	
土壤	2 kg	18	10	8	4	40	24	16	6	Bq/kg (干重)
水	2 L	18	10	8	4	40	24	16	6	Bq/L
牛奶	2 L	18	10	8	4	40	24	16	6	Bq/L
蔬菜	1 kg	36	20	16	8	80	48	32	12	Bq/kg (鲜重)
谷类	2 kg	18	10	8	4	40	24	16	6	Bq/kg (鲜重)
肉类及海产品	2 kg	18	10	8	4	40	24	16	6	Bq/kg (鲜重)

注1: 高纯锗半导体探测器的相对效率为15%。  
注2: 表中数据取自《放射能測定法シリーズ No.29-緊急時におけるガンマ線スペクトル解析法》。

C.2 应急时圆柱型样品盒(Φ50 mm×50 mm)样品的测量时间与最小可探测活度浓度见表C.2。

表 C.2 应急时圆柱型样品盒(Φ50 mm×50 mm)样品的测量时间与最小可探测活度浓度

样品名称	样品量	I-131测量时间				Cs-137测量时间				单位
		10 min	30 min	1 h	10 h	10 min	30 min	1 h	10 h	
大气	10 m <sup>3</sup>	1 000	600	400	200	1 800	1 000	800	400	mBq/m <sup>3</sup>
土壤	100 g	220	140	100	40	500	300	200	80	Bq/kg (干重)
水	100 mL	220	140	100	40	500	300	200	80	Bq/L
牛奶	100 mL	220	140	100	40	500	300	200	80	Bq/L
蔬菜	50 g	440	280	200	80	1 000	600	400	160	Bq/kg (鲜重)
谷类	100 g	220	140	100	40	500	300	200	80	Bq/kg (鲜重)
肉类及海产品	100 g	220	140	100	40	500	300	200	80	Bq/kg (鲜重)

注1: 高纯锗半导体探测器的相对效率为15%。  
注2: 表中数据取自《放射能測定法シリーズ No.29-緊急時におけるガンマ線スペクトル解析法》和《实验室γ能谱测量与分析》。

### 参 考 文 献

- [1] IAEA. Measurement of Radionuclides in Food and the Environment, A Guidebook, Technical Report Series. No. 295, IAEA, Vienna, 1989.
- [2] IAEA. Programmes and Systems for Source and Environmental Radiation Monitoring. Safety Reports Series No. 64. IAEA, 2010.
- [3] ASTM, Standard Practice for the Rapid Assessment of Gamma-ray Emitting Radionuclides in Environmental Media by Gamma Spectrometry, ASTM D7784-12,2012.
- [4] 日本文部科学省.放射能測定法シリーズ No.29-緊急時における ガンマ線スペクトル解析法,2004.
- [5] 李君利.实验室 $\gamma$ 能谱测量与分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
-