

CNIC-01593
CAEP-0087

³⁷Ar 监测技术及现场核查系统研制
³⁷Ar MONITORING TECHNIQUES AND ON-SITE
INSPECTION SYSTEM
(In Chinese)

中国核情报中心
China Nuclear Information Centre

CNIC-01593
CAEP-0087

^{37}Ar 监测技术及现场核查系统研制

段荣良 陈银亮 李 伟 王红侠 郝樊华

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 绵阳, 621900)

摘 要

采用低温气相色谱原理结合气-固化学纯化的办法, 将 ^{37}Ar (Ar) 从“针管”取样获得的空气样品中分离、纯化和提取出来, 制备成放射性测量源, 然后用正比计数装置测量其放射性, 根据监测结果对可疑区域是否在近期内进行了核爆炸作出判断。研究中, 围绕微量 ^{37}Ar 的监测开展了一系列单元技术研究, 包括泄漏气体取样技术, ^{37}Ar 分离纯化技术和 ^{37}Ar 放射性测量技术研究等, 开展了 ^{37}Ar 现场核查系统研制, 取得了一系列阶段性成果。建立了具有先进技术水平 ^{37}Ar 监测方法, 处理空气量 200 L, 实验时间 2 h, ^{37}Ar 放射性探测灵敏度达到 0.01 Bq/L; 研制了适合现场视察 (OSI) 的切实可行的 ^{37}Ar 核查系统。研究工作可为核查保护、核查监督和 CTBT 核查等技术手段的建立提供强有力的技术支撑和设备保障, 对确保我国在 CTBT 问题上继续发挥重要影响具有十分重要的意义。

关键词: 地下核试验, 现场视察, 气体放射性核素, ^{37}Ar , 核查系统

^{37}Ar Monitoring Techniques and On-site Inspection System

(In Chinese)

DUAN Rongliang CHEN Yinliang LI Wei WANG Hongxia Hao Fanhua

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, CAEP, Mianyang, 621900)

ABSTRACT

^{37}Ar is separated, purified and extracted from air sample with a low temperature gas-solid chromatographic purifying method, prepared into a radioactive measurement source and its radioactivity is measured with a proportional counter. Based on the monitoring result, a judgement can be made if an nuclear explosion event has happened recently in a susceptible area. A series of element techniques that are associated the monitoring of the trace element ^{37}Ar have been investigated and developed. Those techniques include leaked gas sampling, ^{37}Ar separation and purification, ^{37}Ar radioactivity measurement and the on-site inspection of ^{37}Ar . An advanced ^{37}Ar monitoring method has been developed, with which 200 liters of air can be treated in 2 hours with sensitivity of 0.01 Bq/L for ^{37}Ar radioactivity measurement. A practical ^{37}Ar On-site Inspection system has been developed. This research work may provide technical and equipment support for the verification protection, verification supervision and CTBT verification.

Keywords: Underground nuclear tests, On-site inspection, Gaseous radioactive nuclides, ^{37}Ar , Inspection system

前言

在裁军领域内，最为各国所关注、讨论、研究和谈判的，莫过于停止核武器试验这个问题。从 1954 年 4 月印度总理尼赫鲁建议停止核武器试验，到 1996 年 9 月联合国通过《全面禁试条约》（CTBT）并开放签字，历时四十多年，其间经历了艰难曲折的谈判过程，谈判中一个最复杂也是最关键的问题就是核查问题。CTBT 谈判完成后，核查问题首当其冲，一方面，必须有严格而有效的国际核查，才能确保条约生效后的有效性；另一方面，在一定程度和一定时期，核查技术在外交斗争中的作用比它用于监督条约履行情况体现得更为明显，以核查技术为基础的核查威慑作用愈来愈显现。我国作为有核国家之一，必须建立自己的国家核查监督技术手段和 CTBT 核查技术手段，才能确保我国在 CTBT 问题上继续发挥重要影响。

CTBT 核查包括远场监测和现场视察（OSI），技术手段上目前已被签约国公认的有地震监测^[1]、放射性核素监测^[2]、水声监测和次声监测^[3]，其中放射性核素监测能为核查提供确凿的证据。核爆炸产生的放射性核素中，有相当一部分是惰性气体，如 ^{37}Ar 、 ^{135}Xe 、 ^{133}Xe 和 ^{85}Kr 等。虽然 ^{133}Xe 、 ^{135}Xe 的活度及其监测灵敏度相对高些，但其寿命较短，对现场视察有时间限制。 ^{85}Kr 的半衰期太长，天然本底又高，大大增加了核事件类型判别的难度。 ^{37}Ar 属于地下核爆炸的特征中子活化产物，它半衰期（35 d）适中，天然本底极低，是现场视察中判断可疑区域是否在近期内进行了核试验的良好指示剂。Richard C. Runchey^[4]曾建议将它作为核试验核查取证的对象，并取场区大气样品作过分析。遗憾的是，他并未从样品中测到 ^{37}Ar ，因而无法对 ^{37}Ar 应用于现场核查的可行性作一定论。在 ^{37}Ar 监测技术研究方面，美国利弗莫尔实验室（LLNL）计划在 2000 年末建立 100 L 级空气中 ^{37}Ar 的分离纯化方法。在 ^{37}Ar 监测系统研制方面，目前国际上还没有适合现场视察（OSI）的切实可行的 ^{37}Ar 核查系统。1996 年，我们在核试验现场开展了 ^{37}Ar 泄漏监测工作，获得了气体放射性核素现场核查十分重要的第一手资料，利用监测结果首次证实了 ^{37}Ar 用于核试验核查的可行性。为了进一步提高 ^{37}Ar 监测技术能力，满足 CTBT 核查的要求，1997 年以来，深入开展了一系列单元技术研究，建立了具有先进技术水平的 ^{37}Ar 分离纯化方法，研制了车载式 ^{37}Ar 现场核查系统。利用该系统调查了原核试验场区气体放射性核素本底，开展了现场核查 ^{37}Ar 的演示实验，通过演示充分展示了监测 ^{37}Ar 的技术能力和水平。

1 ^{37}Ar 的产生机制和性质特征

^{37}Ar 是核爆炸时产生的中子与弹体周围岩石中钙元素发生活化反应生成的，其核反应过程可用以下反应式表示：



^{37}Ar 的半衰期为 35.02 d，长短适中，其衰变纲图如图 1 所示。环境中 ^{37}Ar 本底极低，标准状态下大气中 ^{37}Ar 的活度为 4.67×10^{-7} ($1 \pm 3\%$) Bq/L^[4]。 ^{37}Ar 的性质特征表明，

它不仅是地下核爆炸的特征中子活化产物，而且是 CTBT 现场视察（OSI）中作为核查取证的优选目标核素。

2 ^{37}Ar 监测技术研究

从混入了大量空气的核爆泄漏气体中监测微量的 ^{37}Ar 是一项有挑战性的技术难题。地下核试验中，爆炸产生的 ^{37}Ar 等气体放射性核素通过土壤向地面泄漏， ^{37}Ar 在空气中含量极低，核查中通过直接测量空气样品来监测它的放射性是不现实的。通常采用的办法是将 ^{37}Ar 从空气样品中分离出来，然后纯化、浓集，制成放射性测量源，用物理测量装置测定其放射性。因此， ^{37}Ar 的监测在程序上主要包括三大步骤：泄漏气体取样， ^{37}Ar 分离纯化和 ^{37}Ar 的放射性测量。

2.1 泄漏气体取样

2.1.1 取样方法

如何取到高浓度的 ^{37}Ar 泄漏气体是 CTBT 现场视察中的关键技术之一。现场视察中，气体取样方法有多种，对场区地面空气样品，研究中我们采用了两种方法，一种是利用真空泵或真空容器直接取地面空气，称为直接取样法；另一种是在场区地面覆盖致密性薄膜，然后将取样管道插入薄膜内取样，称为富集膜取样法。对于土壤裂隙中的气体样品，我们设计、建立了一种新颖独特的取样方法，称之为“针管”取样法，其操作流程如图 2 所示。它操作简单，但很有效。

表 1 给出了不同取样方法获得的泄漏气体样品中 ^{37}Ar 活度监测结果。除空腔样品（采用钢丝绳取样，对核查不适用）外，其他各种取样方法所得样品的浓度与取样地点、时间关系密切。表 1 中所列针管样品及空气样品是在同一地点、同一时刻取的，这反映了土壤裂隙中的样品扩散到地面空气中后，被空气稀释大约 3 个数量级。富极膜样品介于两者之间，估计比针管样品要稀 1~2 个数量级。

表 1 不同取样方法所得样品浓度比较

样品类型 ¹⁾	空腔样品	针管样品	空气样品（直接）
$^{37}\text{Ar}/\text{Bq}\cdot\text{L}^{-1}$	4.5×10^5	1.4×10^5	120

注：1) 样品浓度均校正到零时刻。

2.1.2 “针管”取样的实验技术研究

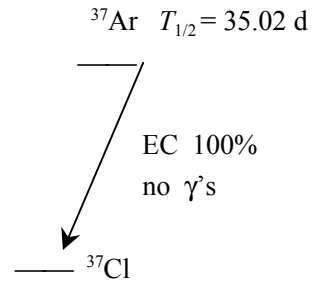


图 1 ^{37}Ar 衰变图

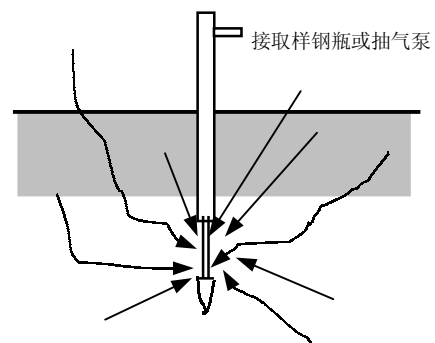


图 2 针管取样示意图

采用“针管”取样的主要目的是采集含³⁷Ar浓度较高的土壤气体。由于取样时必须将“针管”插入土壤中，因此采集的样品一部分来源于土壤，另一部分则可能是沿取样器漏入的地面空气。如何才能取得含土壤气体较多的样品？取样效率与“针管”取样器插入深度、取样速度有何关系？围绕这些问题，针对地下核试验场区地质情况开展了一系列实验研究，实验流程如图3所示。

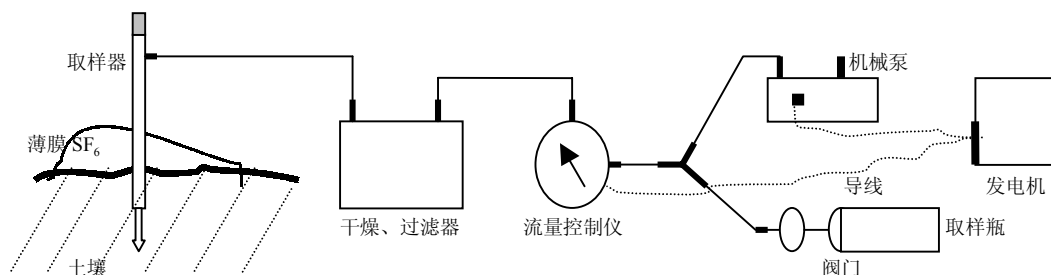


图3 针管取样技术研究的实验流程

实验中，在抽气速率一定的情况下，将“针管”取样器插入土壤中不同深度进行取样，分别在不同抽气量时刻取少量样品进行分析，监测地面SF₆漏入情况。实验结果表明，取样效率与取样器插入深度、抽气速度密切相关，不同土壤也存在很大的差异。表2给出了一定取样速率下，不同取样深度采集的有效土壤气体量。

表2 样品中土壤气体量与取样深度的关系

取样深度/m	0.5	0.8	1.0	1.5	备注
可采集的有效土壤气体量/L	5	30	40	60	实验中采样速度为：5.6 L/min

研究表明，现场视察中采用“针管”取样时，在采样速率为5~10 L/min的情况下，针管插入深度以1.5 m较为适宜。随着深度进一步加大，实验操作的难度将大大增加。实验结果不仅对“针管”取样的具体实验操作有一定指导意义，同时也为“针管”取样法的改进提供了参考依据。例如，可以将针管取样法与富集膜取样法结合起来使用，也可以将多根针管取样器布放在场区内一定范围，然后将取样器上端接口并联起来，通过控制管路中的阀门分别从每一根取样器中采集一定量的土壤气体，大大提高了土壤气体取样效率。在此基础上，我们建立了新型的针管取样法——“阵列”式针管取样。1998年的核试验场区⁸⁵Kr本底调查过程中，采用“阵列”式针管取样获得了圆满的监测结果。

2.2 ³⁷Ar的分离纯化技术

2.2.1 原理

³⁷Ar的分离和纯化是现场核查³⁷Ar的技术难点。我们采用低温气相色谱结合气—固化学纯化的原理对空气中的³⁷Ar(Ar)进行分离纯化。所谓低温气相色谱法，即以气体作为流动相，固定相是其表面有一定活性的吸附剂，当混合样品随流动相通过低温色谱

柱（固定相）时，因吸附剂对各组分的吸附能力不同，经过反复多次的吸附与脱附的分配过程，最后各组分彼此分离而随流动相流出色谱柱。气—固化学纯化主要是利用固体反应床在一定条件下通过化学反应将气体组分中的杂质成分除去的方法。

2.2.2 仪器设备

气相色谱仪：GC—9A 型，日本岛津公司生产

气体流量计：D08—8/ZM 气体质量流量控制仪，北京建中仪器厂生产

气体压力传感器：E5AX 型，日本欧姆龙公司生产

温度控制仪：PXW—9 型，日本富士公司生产

真空计：ZDR—1 型，成华真空有限公司生产

色谱分离柱、化学纯化柱：自制

2.2.3 实验方法

空气样品中 ^{37}Ar (Ar) 的分离纯化系统如图 4 所示。



图 4 ^{37}Ar (Ar) 的分离纯化系统

实验中，以空气为样品。样品首先通过过滤器除去沙土、尘埃，然后进入纯化柱，除去其中的 H_2O 、 CO_2 和 Rn ，接下来通过气体流量计进入除氧柱，由除氧柱除去其中的大部分氧气，最后进入低温下的色谱柱，样品被吸附下来。从气体流量计上读取样品处理量，当处理量满足实验要求时，停止进样。调节色谱柱温度，样品中各组份被分离，分离的组份进一步通过气—固纯化柱除去其中微量的氧气等杂质，最后收集 ^{37}Ar (Ar) 产品。产品充入正比计数管，制成放射性测量源，供放射性测量用。

产品用正比计数装置进行测量（即使只有稳定 Ar 的情况下也是可行的），通过考察坪斜以及坪的长短情况，对产品纯度是否满足物理测量要求进行判断。需要指出的是，为了进一步测定 Ar 的提取效率及纯度，实验中采用纯氦 (He) 代替 CH_4 作流洗气，将 ^{37}Ar (Ar) 收集柱内的产品流洗充入已知体积的金属钢瓶中，然后用 GC-9A 气相色谱仪测定产品中 Ar 的总量及杂质气体含量。

研究中开展了一系列条件实验，对纯化柱以及色谱分离柱的柱温、柱材料类型、柱尺寸等实验参数进行了优化选择，建立了快速、高效分离纯化空气中 ^{37}Ar (Ar) 的实验

方法。

2.2.4 空气中³⁷Ar (Ar) 的分离纯化实验结果

实验结果表明, 本方法处理空气量大, 达到 200 L, Ar 的提取产额达到 45%左右, 产品纯度满足物理测量的要求, 流程操作时间较短, 可在 2 h 内完成一个样品监测, 满足 CTBT 现场视察的要求。

2.3 ³⁷Ar 的放射性测量

从³⁷Ar 的衰变纲图 (见图 1) 可以看出, ³⁷Ar 是一个 100% 的电子俘获核 (EC), 它不发射 γ 射线。因此, 我们主要利用原有的物理测量设备和技术基础, 采用正比计数法测量³⁷Ar 的放射性。测量条件为, 工作电压 3.5 kV, 坪长 100~200 V, 坪斜小于 2%。为了提高³⁷Ar 的放射性测量灵敏度, 重点开展了两方面的工作, 一是设计加工了放射性测量屏蔽系统。屏蔽系统的建立, 大大降低了测量系统本底, 使本底计数由原来的 8 s^{-1} 降至 2 s^{-1} , 降低了 4 倍。二是对原有正比计数管进行了改进, 加工成耐一定高压的全金属正比计数管, 如图 5 所示。在计数管有效测量半径不变的情况下大幅度提高了其容量, 满足了从 200 L 空气中分离获得的³⁷Ar (Ar) 产品的测量要求。



图 5 大容量正比计数管

2.4 地下核试验现场区³⁷Ar 泄漏测量结果

利用³⁷Ar 分离纯化初级流程 (处理量 40 L) 以及正比计数测量装置, 在核试验场区开展了³⁷Ar 泄漏监测工作。现场监测结果表明, 零后 40 d 内, 土壤气体样品中³⁷Ar 的活度为 $0.7 \sim 113692 \text{ Bq/L}$, 它是天然本底的 $10^6 \sim 10^{11}$ 倍, 如此的异常只能用地下核试验来解释。实验结果充分证明了通过现场监测³⁷Ar 来核查地下核试验是行之有效的。

此外, 不同地点针管样品的³⁷Ar 浓度结果差异很大, 反映出地下核爆炸时惰性气体泄漏规律非常复杂, 造成这种复杂性的原因可能与爆炸威力、爆炸形式、地质结构、围岩介质类型以及核装置埋深等均有关系。

从零后 270 d 所取裂隙样品的分析结果来看, 样品中⁸⁵Kr 的活度大于 1 Bq。由于零时刻³⁷Ar 与⁸⁵Kr 的活度处于同一数量级, 因此可以推断这种样品中³⁷Ar 的活度也在 1 Bq 左右。按目前的监测技术水平 (³⁷Ar 检测限 0.01 Bq/L), 零后一年的时间仍有可能从现场监测到³⁷Ar。

3 ³⁷Ar 现场核查系统研制

为了建立适合现场视察 (OSI) 的切实可行的³⁷Ar 核查系统, 研制工作分成两个步骤进行, 第一步是设计、建立³⁷Ar 核查系统初型, 第二步是设计、建立³⁷Ar 现场核查系统。

³⁷Ar 核查系统初型建立的有二, 一是利用它开展监测实验, 通过实验来验证系统

在设计路线上是否可行，找出存在的问题，为 ^{37}Ar 现场核查系统的正式建立奠定基础；二是在现场监测实验中，通过对原核试验场区气体放射性核素本底进行调查，为研究地下核爆炸惰性气体泄漏规律积累数据。外场监测实验证明，系统初型用于现场监测 ^{37}Ar 在技术路线上是可行的，存在的主要问题是取样速率偏低，系统体积庞大，操作比较烦琐。

在 ^{37}Ar 监测系统初型的基础上，重点针对存在的问题，本着小型化、适用于现场操作的原则，同时纳入 ^{37}Ar 分离纯化和放射性测量的最新技术研究成果，对 ^{37}Ar 现场核查系统进行正式设计、研制。

3.1 系统的结构和组成

^{37}Ar 现场核查系统如图 6、图 7 和图 8 所示。



图 6 ^{37}Ar 现场核查系统侧视图



图 7 ^{37}Ar 现场核查系统正视图

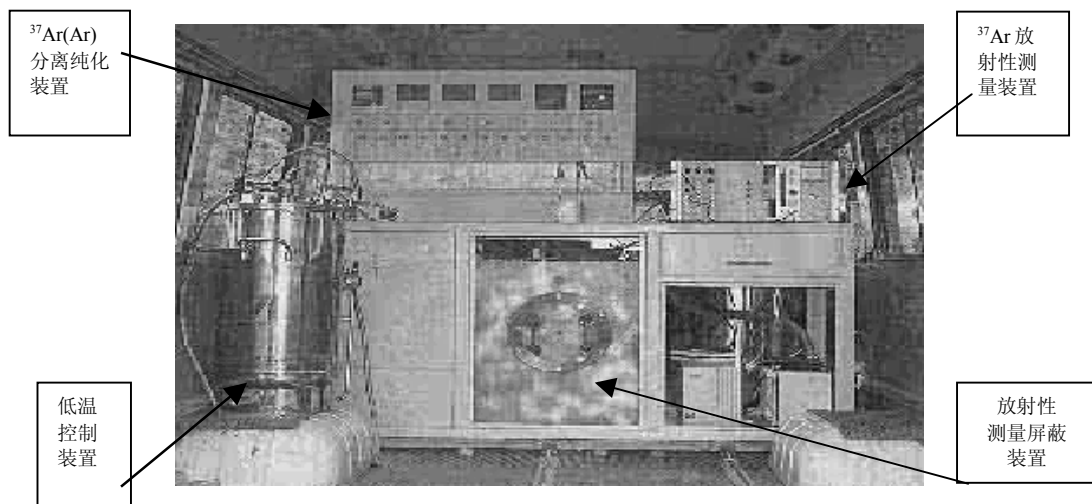


图 8 ^{37}Ar 现场核查系统结构图

系统主要由三大部分组成：1) 泄漏气体取样装置（见图 7），包括“针管”取样器、取样管道等；2) ^{37}Ar 分离、纯化和制源装置；3) ^{37}Ar 放射性测量装置。其次还包括一些辅助设备，如低温控制装置，提供电源的发电机，作为机动和运载工具的监测车，便携式工具箱等。

3.2 系统的操作方法及演示实验

^{37}Ar 现场核查系统建成后，以反应堆辐照 CaO 产生的并由人工投入土壤中的 ^{37}Ar 作为监测对象，分别开展了三次现场核查演示实验（两次预演示，一次正式演示）。下面以演示实验的操作程序为例，介绍 ^{37}Ar 现场核查系统的操作方法。

3.2.1 实验准备

a. ^{37}Ar 分离纯化系统准备

启动发电机，检查电压输出情况，并向核查系统供电。将 ^{37}Ar 分离纯化系统中的纯化柱和色谱分离柱加热活化、抽真空，作好取样准备，系统待命。

b. ^{37}Ar 源项气体投放准备

预先加工一个 1 m（长）× 1 m（宽）× 0.5 m（高）的铁皮箱，壁厚 0.05 m，箱体顶盖带有孔眼，可开关。在离 ^{37}Ar 核查演示车约 30m 处的实验区挖掘一个 2 m（长）× 2 m（宽）× 1.7 m（深）的坑，将铁皮箱放入坑内。

揭开铁皮箱顶层盖板，将绑有雷管的 ^{37}Ar 玻璃瓶放入箱内。 ^{37}Ar 投放量主要根据核试验泄漏到浅表层土壤气体中的浓度进行粗略估算而得，总强度为 3700 Bq。接下来引出雷管引爆线，盖好箱体顶盖，用泥土将坑回填实并与地面平齐，回填深度 1.2 m。

3.2.2 ^{37}Ar 源项气体投放

引爆雷管，炸破埋在地下 1.2 m 深的 ^{37}Ar 玻璃瓶，完成 ^{37}Ar 投放。投放后的 ^{37}Ar 通过箱体顶盖上的孔眼向土壤中扩散、泄漏（说明： ^{37}Ar 现场核查时，3.2.1 中的第 b 项和 3.2.2 节的操作步骤均不需要）。

3.2.3 针管取样器及取样管道的安装

借助外力的作用，将针管取样器插入实验区土壤中，插入深度 1.0 m 左右。将取样管道的一端与“针管”取样器的出气口连接，然后将管道铺至车载系统，通过快速接头将取样管道的另一端与核素分离纯化系统的进气口连接，形成泄漏气体取样通道。

3.2.4 计数管本底测量及监督（本步骤仅为演示实验安排）

在现场核查组（由部分观摩演示的军控专家组成）的监督下，对空白计数管的计数本底进行测量，报告本底测量结果（ 2 s^{-1} ）。然后将空白计数管放入一手提箱内，箱口粘贴封条。在 ^{37}Ar 放射源制备之前，空白计数管由核查组保管、监督。

3.2.5 气体取样

气体取样的具体操作与 2.2.3 节中的取样部分完全相同（此处略）。演示实验中，取样时间 13 min，采集样品量 220 L。

3.2.6 ^{37}Ar 分离、纯化和制源

^{37}Ar 分离、纯化的具体操作与 2.2.3 节中的核素分离纯化部分完全相同（此处略）。 ^{37}Ar 分离纯化完成后，在核查组的监督下，交接空白计数管。将分离提取的 ^{37}Ar 充入空白计数管，制备放射性测量源。

演示实验中， ^{37}Ar 分离、纯化和制源共计用时 102 min。

3.2.7 ^{37}Ar 放射性测量

测量电压 3.5 kV，坪长 200 V，坪斜 $<2\%$ 。 ^{37}Ar 测量记数结果为 1340 cps（超过放射性测量系统的检测限， ^{37}Ar 核查系统中的警报装置发出警报）。

3.2.8 汇报核查结果

向核查组汇报 ^{37}Ar 现场监测结果，随后专家组对演示实验进行现场评价。演示实验充分展示了 ^{37}Ar 现场核查的技术水平和研究成果，获得了圆满成功。

3.3 系统的功能和特点

^{37}Ar 现场核查系统为车载式系统。系统具有设备体积小、操作控制方便、监测能力高、机动性强、自我保障能力完善和可以独立完成野外作业等特点，是目前国内第一台现场核查 ^{37}Ar 的车载式系统，也是国际上第一台适合现场视察（OSI）的切实可行的 ^{37}Ar 核查系统，监测能力满足 CTBT 核查的要求，达到国际先进技术水平。

除此之外，系统还具有组装灵活和多用途性等特点。对系统中部分色谱柱、纯化柱以及物理测量装置进行调整后，该系统可用于现场视察中监测放射性氙（ ^{133}Xe 、 ^{135}Xe ）等气体放射性核素。

4 讨论

4.1 ^{37}Ar 现场核查系统的监测能力

探测灵敏度是体现 ^{37}Ar 现场核查系统监测能力的重要指标，主要包括两个方面，一方面是系统处理空气量的大小以及监测 ^{37}Ar 的放射性探测限高低；另一方面是系统到底能核查多大威力的地下核试验，在核爆后什么样一个时间范围？在离爆心多远的距离等，这些都是众为关注的焦点问题。前一个方面主要是指系统自身的可以量化的性能指标。就目前的 ^{37}Ar 现场核查系统来看，处理空气量 200 L，监测一个样品的时间为 2 h， ^{37}Ar 放射性探测灵敏度为 0.01 Bq/L，满足《现场视察中的测量设备清单和指标》^[5]所规定的 0.05~0.005 Bq/L 探测灵敏度要求。后一个方面是放射性核素核查、甚至所有其它核查技术手段都难以回答的，造成这种情况的原因是地下核爆炸后惰性气体泄漏规律的复杂性以及试验方式的多样性所致。即使是同样威力的地下核试验，如果试验场区地质结构、围岩介质类型、装置埋深以及密封方式等不同，均可能引起试验后泄漏到环境中的惰性气体浓度有很大差异。这种差异的存在，导致难以将核查系统的放射性探测灵敏度与试验威力大小直接联系起来。因此，目前还无法准确回答 ^{37}Ar 现场核查系统到底最低能核查多大威力的核试验。不过，根据核试验现场 ^{37}Ar 的泄漏监测结果，结合演示实验中 ^{37}Ar 核查系统的放射性监测技术能力进行综合分析，可以得出以下保守的带限制性的结论：在类似于我国核试验场区地质结构和实验方式（密封形式等）的情况下，该系统能在核爆后一年、距离爆心约 1000 m 范围内对千吨级威力的地下核试验实施有效的 ^{37}Ar 核查，获取核查取证依据。

4.2 ^{37}Ar 监测技术在现场视察中的应用

采用 ^{37}Ar 监测技术进行现场视察时，通过监测可疑区域内空气样品所含 ^{37}Ar 的浓度，利用测量结果直接对事件的性质（是否是核爆炸）进行判断。目前，对判断核爆炸

事件的 ^{37}Ar 浓度阈值尚无定量数据，CTBT 条约至今也未对此作出具体规定，考虑到 ^{37}Ar 在环境中本底极低，远远低于 ^{37}Ar 现场核查系统的放射性探测限。因此，在现场视察中， ^{37}Ar 监测系统以其自己的放射性探测限作为判断可疑事件是否是核爆炸的阈值。为了提高核查方法的探测灵敏度，现场实施中应充分把握泄漏气体取样等关键环节，沿裂隙或地质断层取土壤气体，尽可能获得 ^{37}Ar 浓度高的样品。

4.3 其它

本工作是 ^{37}Ar 监测单元技术研究和现场核查系统研制的结果，对于系统和技术方法在现场视察中的具体应用，以及确保监测技术手段的有效性和可靠性，充分发挥监测技术手段在国家安全中的作用，有待于进一步深入开展相关的研究。一方面，加强对地下核爆炸中惰性气体泄漏规律研究，充分利用原核试验现场 ^{85}Kr 开展工作，同时结合理论计算，必要时甚至进行一定的化爆模拟和标定实验，为核试验现场视察提供依据和指导。另一方面，进一步开展核查澄清和核查保护技术研究，通过开展场区气体放射性核素本底调查，同时充分利用地下核试验气体放化诊断数据总结，加强对地下核爆炸中气体放射性核素的行为特征研究，特别是把对违约或不违约现象的识别作为研究的重点和关键。

5 结论

通过研究，建立了具有先进技术水平的 ^{37}Ar 监测方法，处理空气量 200 L，实验时间 2 h， ^{37}Ar 的放射性探测灵敏度达到 0.01 Bq/L，满足 CTBT 核查的技术要求。研制了车载式 ^{37}Ar 现场核查系统，系统具有设备体积小、操作控制方便、机动性强、自我保障能力完善和可以独立完成野外作业等特点，是切实可行的 ^{37}Ar 核查系统。综合分析表明，对于一定的地下核试验条件，该系统能在核爆后一年、距离爆心近 1000 m 的范围内对千吨级威力的核试验实施有效地核查，获得核查取证依据。

本工作得到了陈涵德研究员、黄瑞良研究员的支持和指导，特此表示衷心感谢。

参考文献

- 1 Hannon W J. Seismic Verification of a Comprehensive Test Ban. Science, 1985, 227: 251~257
- 2 Perkins R W, et al. Airborne Radionuclides of Concern and Their Measurement in Monitoring a Comprehensive Test Ban Treaty. DE-9500781/HDM, Jan, 1995
- 3 Zucca J J, et al. Signatures of Testing: On-site Inspection Technologies, UCRL-JC-119213, Jan., 1995
- 4 Richard C. Runchey. Treatise on the Measurement of Radioactive Argon in the Atmosphere. AD-A172525/8/HDM, Mar., 1984