

# 核法证学:打击非法贩卖核材料的利器

张继龙,周志波,高雪梅,刘立坤,田川

国家核安保技术中心,北京 102401

**摘要** 介绍了核恐怖主义威胁现状、核法证学基本过程、分析技术、核归因分析等,阐述了核法证学作为打击非法贩卖核材料之利器,所采用的技术手段、分析方法与过程及发挥的作用,提出了核法证学发展面临的困难与挑战。

**关键词** 核法证学;核恐怖主义;核材料

核恐怖主义主要有4种形式:偷窃和使用核武器,自制和使用核武器,攻击核设施,制造和使用放射性“脏弹”,这些都与核材料直接或间接相关。因此,防止核材料被非法贩卖或非法转移,是预防核恐怖主义最有效也是最高效的方法之一。

据国际原子能机构(IAEA)判断,

走私大量核武器及核材料的可能性很小,但涉及少量核材料的犯罪在国际社会上时有发生。IAEA建立的非法贩卖数据库(ITDB<sup>[1]</sup>)统计显示(图1<sup>[2]</sup>),1993—2014年间共有2656宗<sup>[2]</sup>涉及非法使用、转运和拥有核材料或其他放射性材料的案件发生,其中,非法交易的核材料高浓缩铀高达17 kg、钚材料400 g。

从核不扩散的角度看,非法贩卖和盗窃核材料可能导致核扩散,也可能导致由许多小量核材料累积制造而成的简易核武器或放射性散布装置。因此,阻止武器级核材料和其他核材料或放射性物质掌握在潜在的核恐怖主义组织、恐怖分子手里,就成为预防核恐怖主义事件发生的基本原则。

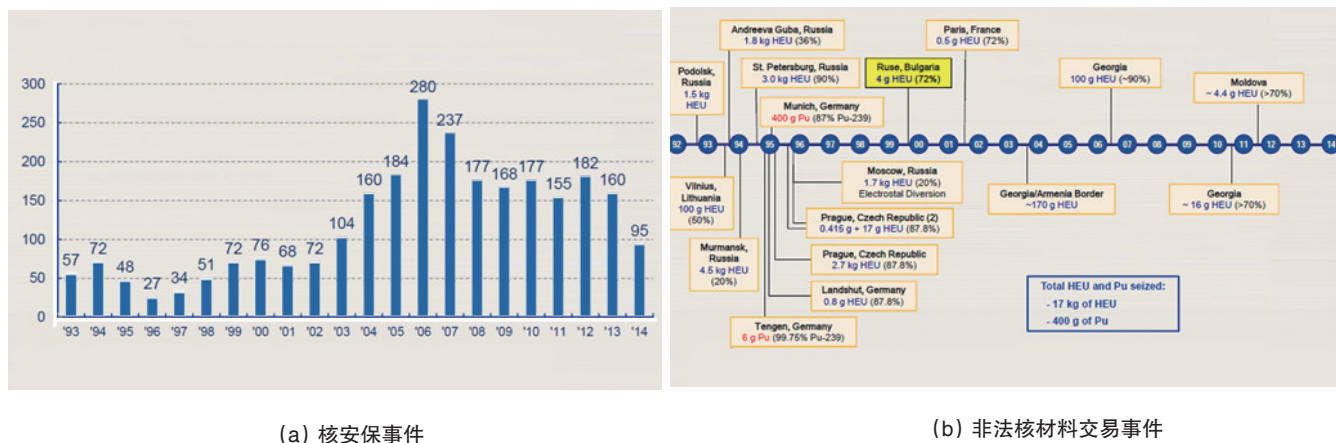


图1 1993—2014年间IAEA统计的核安保事件及非法核材料交易事件

Fig. 1 Nuclear security events and the nuclear material seizures between 1993 and 2014 from IAEA statistics

## 1 核法证学概述

在早期涉核犯罪案件的调查过程中发现,传统法证技术无法对核材料进行取证,分析线索时常需要借助放射化

学、地球化学、核物理、核工程、材料科学、分析化学等学科领域。20世纪90年代初,开始研发专门针对核材料的取证分析技术。因此,核法证(Nuclear

Forensics)技术开始作为刑侦学的一个分支逐渐得到发展<sup>[3]</sup>。核法证学定义<sup>[4]</sup>是,对截获的非法贩卖的核材料和其他放射性物质及其任何相关材料进行分

收稿日期:2016-06-22;修回日期:2016-07-15

作者简介:张继龙,副研究员,研究方向为质谱分析,电子信箱:190934471@qq.com

引用格式:张继龙,周志波,高雪梅,等.核法证学:打击非法贩卖核材料的利器[J].科技导报,2016,34(15):63-65;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2016.15.008

析,为核归因分析提供证据。分析的目的在于找出截获的核/放射性样品,或来源于材料特征、工艺历史的指纹信息,这种对材料的表征及与其生产历史相关性的分析,即构成了核法政分析。

传统法证学的要素包括对指纹、头发、纤维和脱氧核糖核酸(DNA)的分

析。分析过程为收集疑似核材料或其它放射性物质,测定其主同位素和次要同位素的含量、浓度以及包括结构和形态特征在内的物理数据。因此,核法证学与传统法证学相辅相成,是一种为了追溯核材料的来源与历史,可提供涉核犯罪线索和证据的综合技术方法。

## 2 核法证学调查基本过程

在截获可疑的核材料或放射性物质、初始侦查确认为可能的涉核违法事件后,将启动核法证调查,其基本过程如图2所示。

对某特定的核材料或放射性样品进行归因需要分析和收集大量的特征信息,如同位素分析、年龄测定、杂质元素分析和传统法证分析等,以期得到与之相关的蛛丝马迹(图3),为核材料溯源和归因找到确凿的证据。然而,多数的特征信息波动范围窄且不明显,因此需要高精度、高灵敏度和多技术手段的综合运用,借助多元统计和数据迭代的方法防止遗漏和误判。

## 3 核法证分析技术

核法证分析<sup>[4]</sup>技术可概括为4大类:现场快速分析技术、总体分析技术、成像技术和微区分析技术(表1)。

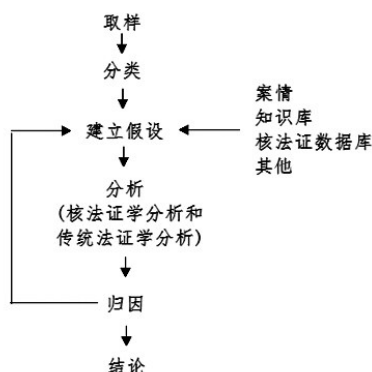


图2 核法证学过程

Fig. 2 Procedure of nuclear forensics

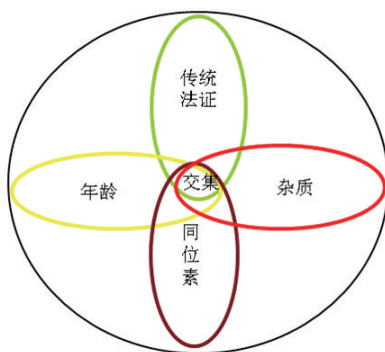


图3 特征信息的信息迭代法

Fig. 3 Iterative Intersection

表1 核法证分析技术

Table 1 Analytical tools for nuclear forensics

技术类型	仪器设备	信息类型	探测限	空间分辨率	说明
现场快速分析	高分辨率 $\gamma$ 谱仪(HRGS)	同位素信息	ng~ $\mu$ g		
	化学分析	元素信息	$10^{-3}$		
总体分析	放射化学/放射性计数方法	元素、同位素信息	fg~pg		将核材料或放射性物质看做一个整体,对其元素和同位素进行表征
	热电离质谱(TIMS)	元素、同位素信息	pg~ng		
	电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)	元素、同位素信息	fg~pg		
	辉光放电质谱(GD-MS)	元素、同位素信息	0.1~10 $\mu$ g/g		
	X射线荧光(XRF)	元素信息	10 $\mu$ g/g		
	X射线衍射(XRD)	分子信息	5%*		
	气-质联用(GC-MS)	分子信息	$\mu$ g/g		
成像	红外	分子信息	$\mu$ g/g		材料高倍放大图像,确认样品的同位素或异质性
	目视检查	宏观信息	0.1 mm		
	光学显微镜	微观信息		1 $\mu$ m	
	扫描电子显微镜(SEM)	结构信息		1.5 nm	
微区分析	透射电子显微镜(TEM)	微观信息		0.1 mm	对于异质性样品,微分析可对材料的单个组分进行定量或半定量表征
	电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)	元素、同位素信息	pg~ng		
	热电离质谱(TIMS)	元素、同位素信息	pg~ng		
	二次离子质谱(SIMS)	元素、同位素信息	0.1ng/g~10 $\mu$ g/g	0.2~1 $\mu$ m	
	波长色散/能量色散扫描电子显微镜(EDS/WDS-SEM)	元素信息	0.1%~2%	1 $\mu$ m	
	X射线衍射(XRD)	分子信息	5%*		

注:\*是原子数百分含量。

## 5 核归因分析

核归因分析是对所有核法证学证据和传统法学的证据进行分析,确定其生产方法和材料的可能来源。核归因分析<sup>[1]</sup>的内容包括:核法证分析的结果,对放射化学和环境识别标志的了解,核材料和核武器生产相关背景知识,来自执法机构和情报机关的资料。核归因分析是通过综合所有核走私事件的相关分析结果,重新分析和解读核事件的方法。

核归因分析利用的是核材料特征与工艺历史的相关性。核材料特征主要包括物理特征、化学特征、元素和同位素信息等。

1) 材料的物理特征包括固体物质的质地、尺寸、形状及粒径分布。如二氧化铀芯块的尺寸往往是制造厂独有的;氧化铀粉末的粒度分布可以提供铀转化工艺的证据;表面黏附物也可反映出生产工艺情况等。

2) 材料的化学特征,如不同价态

的铀氧化物,均能体现出其可能处在铀燃料循环的不同过程;一些有机化合物与核材料共生,可以反映出后处理操作的情况等。

3) 材料的元素信息,包括材料中的主要元素、次要元素和痕量元素。主要元素可确定核材料的品种和数量;次要元素如铟、钷、镓等可确定其功能;痕量元素可证明其生产工艺溯源出其生产地点等。

4) 材料的同位素信息,如<sup>235</sup>U和<sup>239</sup>Pu的同位素含量可确定其是民用还是军用材料,<sup>236</sup>U可确定其是否经过反应堆辐照。放射性同位素衰变产物和母体同位素的相对含量可以确定材料的“年龄”;钚同位素比能揭示其生产所用铀的富集度、辐照中子范围和反应堆中的辐照时间;短寿命裂变产物的浓度可揭示化学信息等。

## 5 核法证学发展面临的问题

多元统计分析与核材料生产过程

中产生的指纹标记物相关联,是追溯核材料或其它放射性物质来源与历史的途径之一,而建立健全核法证学数据库是解决该问题的关键。但核材料尤其核武器的信息,被各国视为高度机密信息,部分核材料数据无法纳入数据库,也很难在国际交流中建立共享机制,导致核法证学数据库的全面性和有效性无法得到保障,这是核法证学在前进道路上遇到的最大障碍。

## 6 结论

随着核电的蓬勃发展以及核科学技术应用的日益广泛,核材料和放射源的数量急剧增多,在核恐怖主义威胁日趋严峻的大背景下,防止和打击核材料与其他放射性物质的非法转移或贩卖,是预防核恐怖主义的重要方法。核法证学通过先进的核分析技术对核材料进行追踪溯源,为打击非法贩卖提供了有力武器,也势必在核安保领域发挥更加重要的作用。

## 参考文献(References)

- [1] EURO P OL. Combating illicit trafficking in nuclear and other radioactive material[J]. IAEA Nuclear Security, 2007(6): 3-12.
- [2] IAEA. Incident and trafficking database(ITDB)[EB/OL]. 2015-11-05 [2016-06-10]. <http://www-ns.iaea.org/security/itdb.asp?s=4&l=28>.
- [3] Wallenius M, Mayer K, Ray I. Nuclear forensic investigations: Two case studies[J]. Forensic Science International, 2006, 156(1): 55-62.
- [4] IAE Agency. Nuclear forensics support[J]. IAEA Nuclear Security, 2006(2): 15-20.

# A weapon against illicit trafficking of nuclear materials: Nuclear forensics

ZHANG Jilong, ZHOU Zhibo, GAO Xuemei, LIU Likun, TIAN Chuan

State Nuclear Security Technology Center, Beijing 102401, China

**Abstract** This paper reviews the threat of nuclear terrorism, the process of nuclear forensics, the nuclear forensics technology, and the nuclear attribution analysis, including the technical means, the analysis methods and the processes of the nuclear forensics as a weapon against illicit trafficking of nuclear materials. Some nuclear forensics challenges are pointed out.

**Keywords** nuclear forensic; nuclear terrorism; nuclear materials

(编辑 韩丹岫)