

CNIC-00420

FRDIN-0004

CN 9200879

中国核科技报告

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT

核电站燃料元件²³⁵U丰度无损检查仪

A NONDESTRUCTIVE TESTING DEVICE FOR
DETERMINING THE ²³⁵U ENRICHMENT
IN THE POWER REACTOR
FUEL ELEMENTS

(In Chinese)



原子能出版社

中国核情报中心

China Nuclear Information Centre

CNIC-00420

FRDIN-0004

核电站燃料元件²³⁵U丰度无损检查仪

刘兰华 刘南核

(核工业第五研究设计院, 郑州)

摘 要

介绍了燃料元件 UO_2 芯块中²³⁵U丰度混料的无损检查仪(以下简称丰度仪)的研制和使用情况。该丰度仪采用无源 γ 射线测量技术,使用带孔碘化钠晶体和四通道多路分析器,提高了检测效率,用平均值比较法处理数据降低了误检率。仪器结构简单,操作方便,为我国燃料元件生产提供了一种新的检测手段,已成功地用于秦山核电站燃料元件生产检验。

**A NONDESTRUCTIVE TESTING DEVICE FOR
DETERMINING THE ²³⁵U ENRICHMENT IN THE
POWER REACTOR FUEL ELEMENTS**

(In Chinese)

Liu Lanhua Liu Nangai

(THE FIFTH RESEARCH AND DESIGN INSTITUTE OF
CHINA NATIONAL NUCLEAR CORPORATION, ZHENGZHOU)

ABSTRACT

The development of a nondestructive testing device is presented which is used for determining the ²³⁵U enrichment in the mixed fuel of fuel elements with UO₂ pellets. The testing efficiency is improved because the passive gamma ray method and a hole-bored NaI crystal and four channel multichannel analyzer are used. The false discrimination rate is reduced as the average comparing method is taken. This device is simple in structure and easy in operation. It has provided a new testing tool for the fuel elements production in China. This device has successfully been used in Qinshan Nuclear Power Plant in testing its fuel elements.

引言

燃料元件在动力堆中运行，如果其中 UO_2 芯块的 ^{235}U 丰度不符合设计要求，将影响中子通量分布，使元件产生不均匀的热量分布。为了使燃料元件在堆中安全、可靠地运行，生产过程中元料芯块的 ^{235}U 丰度必须严格控制。利用 γ 射线探测器测量 ^{235}U 衰变时放出的185.7keV γ 射线的相对强度，可以测量燃料元件的 ^{235}U 丰度。根据设计要求研制成的丰度检测仪可同时对四根元件进行检查。当元件中装填一定丰度值的 UO_2 芯块时，其中如果混装一块丰度值相差0.3%的芯块，便可准确地挑选出来，漏检率小于1%，每40~60分钟可检查四根元件。

研制成的丰度仪结构简单，操作方便，价格便宜，为元件生产过程提供了一台有效的丰度混料检查设备。

国外在核燃料生产中除采用这种无源技术外，还采用有源同位素技术，即中子活化技术，但该技术的设备复杂，价格昂贵，只是在元件生产量很大时才考虑使用。

1 工作原理及设备

燃料元件的 UO_2 芯块中 ^{235}U 同位素产生 α 衰变，其中伴随有能量为185.7keV的 γ 射线辐射。当 UO_2 样品厚度超过0.32cm时，其中放出的185.7keV γ 射线的强度就正比于 ^{235}U 同位素的丰度，图1为 UO_2 芯块的 γ 射线能谱图。对不同的 ^{235}U 丰度，其能谱曲线相似，但在185.7keV全能峰处有明显的区别，因此测量185.7keV峰的面积，即可正确地反映出其 ^{235}U 同位素丰度^[1-3]。

探测器由特别的 $\phi 60 \times 50$ mm带孔NaI晶体、光电倍增管和射极跟随器组成，它被放置在6mm厚的铅筒中，元件放出的 γ 射线由两个圆柱形铅筒准直，其示意图见图2。

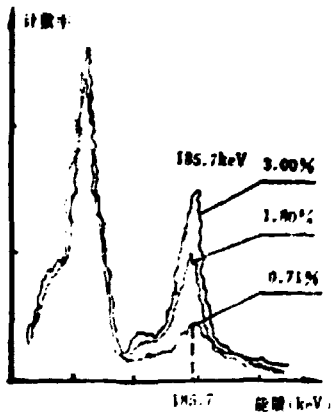


图1 UO_2 γ 射线能谱图

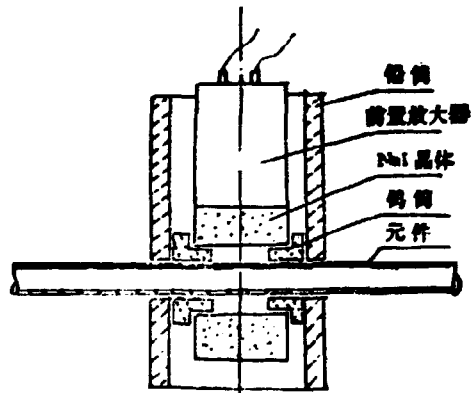


图2 探测器示意图

探测器产生的信号由电缆送入测量仪器。测量仪器是北京核仪器厂研制的，由FJ-1907型1024道多路脉冲幅度分析器与四路计数器连接成四路多定标测量方式。将来自四个探测器的脉冲信号分别送入各自对应的放大器，然后送入四路计数器，再送入各自对应的256道

区。待256道定标计数完成后即停止测量，并由显示器显示测量结果。此后即可将测得的数据送入TRS-80计算机进行数据处理，结果可由打印机打出或存储在磁盘上。测量仪器的方框图见图3。

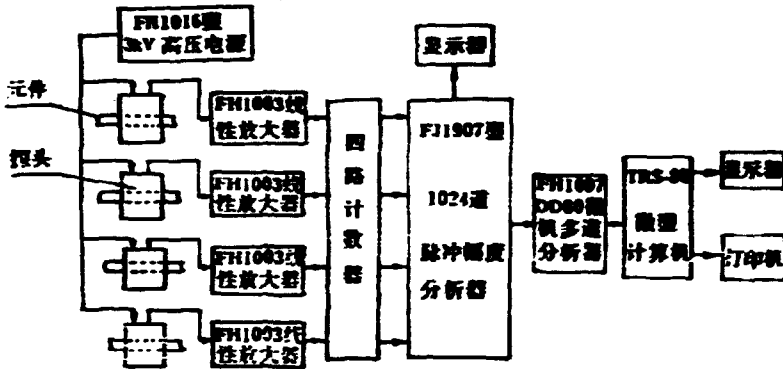


图3 仪器方框图

装填有UO₂芯块的元件由传动装置匀速送入探测器，它由传动台架，探测器台架及上下料台架组成。为了避免传动元件时产生的振动影响探测器测量，三个台架彼此是分离的。传动台架为传动元件用，由SCR-D系列宽调直流伺服电机带动丝杠运行，元件固定在溜板上作往复直线运动，速度在20~1500mm/min范围内连续可调，四个探测器并列置于探测器台架上，各自的位置均可单独地在一定范围内上下左右调节，以保证元件传动时准确地通过探测孔中心。

当装填有UO₂芯块的元件匀速通过探测器后，在测量屏幕上显示出一系列测量点，该点的数值表示185.7keV峰的积分强度，如果UO₂芯块的²³⁵U丰度值不变，则这些点将组成一条平行X轴线的直线，如果其中混装有不同丰度的芯块，则相应点的位置将产生偏离，在图4中明显地看出有低于平均线的点，由这些异常点的位置可相应地找出异常芯块在元件中的位置。由偏离平均线值的大小可判断其丰度差值。

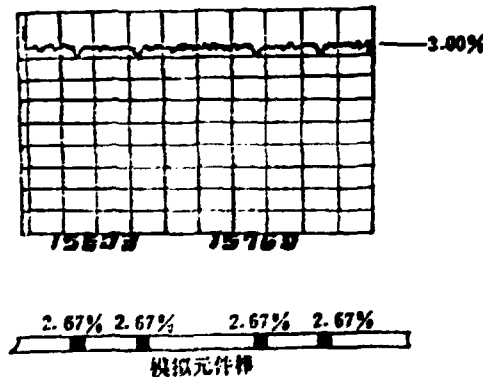


图4 丰度异常芯块的屏幕显示图

2 工作参数的选择及数据处理

2.1 工作参数

2.1.1 探头准直缝宽度

探头是用钨准直器准直的，在动态检查时缝太窄不仅使灵敏度下降，而且使漏检率加大，这主要是因为异常丰度芯块的计数率来不及反映出来，异常芯块已离开准直孔。当准直缝太宽时，由于异常芯块在准直缝中占的比例不高，容易被正常芯块所淹没，因而漏检率也增大。准直缝与漏检率的关系曲线表示在图5中。

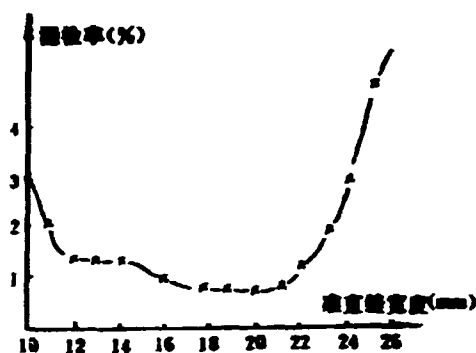


图5 不同准直缝与漏检率的关系

2.1.2 元件传动速度

元件传动速度越慢，图4异常点的显示就越清晰，但检查速度是有要求的，如果元件传动速度过慢，则这种方法将不能使用。元件传动速度过快，图4异常点显示就不清晰，漏检率加大。经多次试验采取折中的方法，确定要检测出一块丰度异常的芯块，元件传动速度为每分钟75mm时，漏检率为1%。

2.1.3 多定标测量时间

这个参量与元件传动速度是要综合考虑的，因为在一定的元件传动速度下，多定标测量时间过长，则丰度异常点在屏幕上显示点少，不利于挑检。反之，如多定标测量时间短，则丰度异常点反应差值少，也不利于挑检。经过多次试验采用每道测量时间为8秒。

2.1.4 其它参数

光电倍增管高压为800V，放大器放大倍数为64，四路计数器的上下甄别阈值根据各自接收的185.7keV峰的面积确定。

2.2 数据处理

扫描标准元件棒（即²³⁵U同位素丰度值经过精确标定了的元件棒），所得计数率取平均值为标准值，记为 n ，标准值减去一个常数 A 作为判别值，记为 n_n ，令

$$n_n = n - A$$

对待测元件进行扫描，把所测得的计数率按顺序每次求平均值，得 $n(J)$ ，其中 J 表示与芯块位置相关连的道址数。然后将 $n(J)$ 与 n_n 依次比较，若棒中混入了一块丰度不同的芯块，例如在100道的位置，它产生的计数率的平均值为 $n(100)$ ，这时：

如果 $n(100) < n_n$ ，则正确检出了混入的芯块；

如果 $n(100) > n_n$ ，则称为漏检；

如果棒中没有不同丰度的芯块混入，但仍有 $n(I) < n_0$ 出现，则在I道位置出现误判情况。计算机最后打印出如下结果：

Sample number=15

A=240

Difference number=2

Difference position (CH) 100 128

给出的100及128两数是多道分析器的道址，它与元件棒的长度相对应，因此可以得知在元件棒中什么位置有不同丰度的芯块混入。

3 实验结果

在模拟元件棒中装入70块 ^{235}U 同位素丰度为3.00%的芯块，其中夹杂了一块丰度为2.67%芯块，按照已定的工作参数进行了大量试验，在表I中按四个通道结果分别给出漏检与误判的情况，总的漏检与误判率为千分之五。

表I 检验时的漏检与误判次数

测量日期	I通道		II通道		III通道		IV通道	
	漏检 (次)	误判 (次)	漏检 (次)	误判 (次)	漏检 (次)	误判 (次)	漏检 (次)	误判 (次)
85.4.14	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
85.4.16	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	1
	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	1	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
85.12.2	0	0	0	0	0	0	0	1
	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	1	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
85.12.8	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0

4 仪器的主要技术指标及检验结果

1986年12月对仪器进行了鉴定,其检验结果列于表2。

表2 技术指标及检验结果

序号	技 术 要 求	检 验 结 果	备 注
1	可以在元件棒中混入一块 ²³⁵ U同位素丰度差0.3%的芯块。	元件棒基体芯块丰度为3.00%,夹杂一块丰度为2.65%的芯块,或基体芯块为3.65%,夹杂一块3.00%芯块均可查出。	
2	检出夹杂一块丰度差为0.3%芯块的漏检率为5%	每70块3.00%的芯块中夹杂一块2.65%的芯块,扫描1000块芯块,未发现漏检与误判。	
3	每根元件棒扫描一次需要40~60分钟,采用四通道同时检测,每根可检查20根元件棒。	每根元件棒约需40分钟,同时可检查4根棒。	每次只检查单棒中心段的2米长。
4	测量数据及结果由计算机处理数据,并可打印成表,也可贮存在软盘中。	满足技术要求。	
5	仪器每天连续稳定运行18小时	可连续稳定运行18小时。	
6	传动装置可将元件棒匀速向前或向后传动,速度由20~1500mm/min连续可调	达到技术要求,在65mm/min速度下运行时,误差小于±0.5mm/min。	
7	传动装置运行时,探头不受振动影响。	传动台架与探头台架为分离式,探头不受影响。	
8	传动装置可随时停车,并有行程限位开关控制停车。	具有随时停车及限位停车功能。	

5 结论

我们的WK-86型燃料元件²³⁵U丰度无损检查仪可同时检查四根元件中²³⁵U芯块的混料情况,检查其中混入一块丰度差0.3%的芯块时,每40分钟可检查4根元件,如果混入多块不同丰度的芯块或混入丰度差大于0.3%的芯块时,检查速度可以加快,在区分两根其中所有芯块的丰度均相差0.3%的元件时,只须两分钟就可以检查出来。

第一台丰度仪已成功地用于检查秦山核电站燃料元件生产检验,使用单位认为设备结构基本合理,稳定性及重复性好,国家核安全局为了保证秦山核电站的安全,要求元件棒的上

度必须100%地进行无限制检测。因此，1989年又复装了两台丰度仪，1989年8月已用于生产检测。

当然第一台丰度仪的检测速度还不高，也难以满足大生产的需要，而且对寿命不足100天的燃料芯块样品由于子体衰变的影响造成误差，这类问题有待进一步解决。目前我们正在研制第二代丰度仪，就是要解决子体衰变影响及提高检测速度。

参加实验工作的还有李文丰，参加仪器研制的有北京核仪器厂赵克礼，马朝贵，参加传动装置设计的有张凯，李立家等同志，在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] H.Ottmar, P.Matuszek, Inprocess control of ^{235}U enrichment in an LWR fuel fabrication plant, IAEA-SR-729 (1979)
- [2] P.Matuszek, H.Ottmar, Gamma-ray spectrometry for inline measurement of ^{235}U enrichment in a nuclear fuel fabricating plant, IAEA-OM-201/46 (1978)
- [3] Quality assurance and control in the manufacture of metal-clad UO_2 reactor fuels, IAEA, Vienna (1976)
- [4] 刘益华, 刘南薇, 反应堆燃料元件 ^{235}U 的丰度检查, 核科学与工程, Vol.16, No.2, p206 (1985)

核电站燃料元件（中压无膜检查仪）

原子能出版社出版

（北京2108信箱）

河北省清河印刷厂印刷

☆

16开 202×1002 1/32 印张1.1 字数6千字

1990年7月北京第1版 1990年7月北京第1次印刷

ISBN7-5022-0306-0

TL·127

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT

ISBN 7-5022-0306-0

TL · 127

P.O.Box 2103

Beijing, China

China Nuclear Information Centre