

中华人民共和国国家标准

GB 15146.2—2008  
代替GB 15146.2—1994

反应堆外易裂变材料的核临界安全  
第2部分：易裂变材料操作、加工、处理  
的基本技术规则与次临界限值

Nuclear criticality safety for fissile materials outside reactors—  
Part 2: Basic technical practices and subcritical limits for  
handling, processing and operations with fissile materials

2008-09-19发布  
2009-08-01实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局  
中国国家标准化管理委员会  
发 布

目 次

前言

- 1 范围
- 2 规范性引用文件
- 3 术语和定义
- 4 基本技术规则
- 5 计算方法的确认
- 6 易裂变核素的单参数限值
- 7 多参数控制
- 附录A（资料性附录） 可能造成工艺条件变化的典型事件
- 附录B（资料性附录） 计算方法确认示例
- 附录C（资料性附录） 关于计算方法的讨论
- 参考文献

前 言

本部分的全部技术内容为强制性。

GB 15146《反应堆外易裂变材料的核临界安全》迄今已经发布了下列11个部分：

- GB 15146.1 第1部分：核临界安全行政管理规定（代替GB 15146.1—1994）
- GB 15146.2 第2部分：易裂变材料操作、加工、处理的基本技术规则与次临界限值（代替GB 15146.2—1994）
- GB 15146.3 第3部分：易裂变材料贮存的核临界安全要求（代替GB 15146.3—1994）
- GB 15146.4 含易裂变物质水溶液的钢质管道交接的核临界安全准则
- GB 15146.5 钚-天然铀混合物的核临界控制准则和次临界限值
- GB/T 15146.6 硼硅酸盐玻璃拉希环及其应用准则
- GB 15146.7 次临界中子增殖就地测量安全规定

- GB 15146.8 第8部分：堆外操作、贮存、运输轻水堆燃料单元的核临界安全准则（代替GB 15146.8—1994）
- GB 15146.9 核临界事故探测与报警系统的性能及检验要求
- GB 15146.10 固定中子吸收体的应用安全要求
- GB/T 15146.11 基于限制和控制慢化剂的核临界安全

本部分为GB 15146的第2部分。

本部分代替GB 15146.2—1994《反应堆外易裂变材料的核临界安全 易裂变材料操作、加工、处理的基本技术准则与次临界限值》。

本部分与GB 15146.2—1994相比主要变化如下：

- 增加了前言和附录C（资料性附录）；
- 将“计算方法的验证”（1994版）改为“计算方法的确认”（本版第5章），并增加了一般要求；
- 将<sup>233</sup>U的次临界限量列入本版第6章；
- 对助动词“必须”改为“应当”、“宜”或“可以”。

本部分的附录A、附录B和附录C为资料性附录。

本部分由全国核能标准化技术委员会提出。

本部分由全国核能标准化技术委员会归口。

本部分起草单位：核工业标准化研究所、中国原子能科学研究院、中国工程物理研究院。

本部分主要起草人：嵇凤官、朱庆福、乔录成。

本部分于1994年首次发布。

# 反应堆外易裂变材料的核临界安全

## 第2部分：易裂变材料操作、加工、处理

### 的基本技术规则与次临界限值

#### 1 范围

GB 15146的本部分规定了反应堆外易裂变材料操作、加工、处理的基本技术规则和一些几何形状简单的易裂变材料单体的次临界限值，并对确立核临界安全评价用计算方法的有效性和适用范围提出了要求。有关核临界安全行政管理的基本要求见GB 15146.1。

本部分适用于反应堆外易裂变材料的操作、加工和处理。

本部分不适用于受控条件下易裂变材料的装配操作（如临界实验）。

#### 2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本部分的引用而成为本部分的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修订版均不适用于本部分，然而，鼓励根据本部分达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本部分。

GB 15146.5 反应堆外易裂变材料的核临界安全 钚-天然铀混合物的核临界控制准则和次临界限值

#### 3 术语和定义

下列术语和定义适用于GB 15146的本部分。

##### 3.1

有效增殖因子 $k_{\text{eff}}$  effective multiplication factor ( $k_{\text{eff}}$ )

物理上，是某一时间间隔内所产生的中子总数（不包括强度不是裂变率函数的中子源所产生的中子）与同一时间间隔内因吸收和泄漏而损失的中子总数之比。

##### 3.2

临界事故 criticality accident

意外发生的自持或发散的中子链式反应所造成的能量释放事件。

##### 3.3

核临界安全，临界安全 nuclear criticality safety

- 预防临界事故和减轻临界事故的后果，其中首要的是防止此类事故发生。
- 3.4 受控参数 controlled parameter  
使其数值保持在规定的限制范围内的参数。
- 3.5 次临界限值 subcritical limit  
为受控参数规定的能使系统在规定条件下肯定处于次临界状态的限制性数值。这种参数限值含有为导出它时所用计算结果和实验数据的不确定度所留的裕量，但未包括应对偶然事件（如双批投料、样品分析结果不正确等）所需要的裕量。
- 3.6 面密度 areal density  
垂直投影在平面单位面积上的易裂变材料的总质量。对于无限大均一平板，面密度等于平板的厚度与该平板内易裂变材料密度的乘积。
- 3.7 计算方法 calculational method  
提供计算结果的计算程序，包括数学方程、近似、假设、有关数值参数（如截面数据）等。
- 3.8 偏倚 bias  
计算方法的计算结果与实验数据之间系统性差异的一种量度。
- 3.9 偏倚的不确定度 uncertainty in the bias  
对计算结果的准确度与精密度和实验数据的不确定度两者的一种量度。
- 3.10 适用范围 area (or areas) of applicability  
材料组分、几何布置、中子能谱和其他有关参数（如非均匀度、泄漏、相互作用、吸收等）等的限定范围，在这个（或这些）范围内计算方法的偏倚业已确定。

## 4 基本技术规则

### 4.1 一般要求

系统的有效增殖因子 ( $k_{\text{eff}}$ ) 依赖于易裂变材料和所有其他有关材料的质量、分布和核特性。  
应当将系统的一个或者多个参数控制在次临界限值以内，并为应对工艺偶然事件留出次临界度裕量，来实现核临界安全。可以采用下列手段对系统的参数进行控制：

- a) 实体限制，例如，将溶液限制在直径不大于规定值的圆柱形容器内；
- b) 测控设备，例如，利用能测量浓度和防止易裂变核素在化学系统中聚集的设备，使易裂变核素的浓度保持在规定值以下；
- c) 化学手段，例如，防止能引起沉淀的条件出现，使水溶液保持其特有的浓度特征；
- d) 固有或可信的事件进程，例如，依靠工艺过程的固有特性，使铀氧化物的密度始终小于理论密度的某一规定份额；
- e) 行政管理程序，例如，要求所操作的易裂变材料的质量不超过张贴的限值；
- f) 其他手段。

### 4.2 受控参数

应当明确规定所有受控参数及其限值。应当清楚地了解这些参数的变化对系统 $k_{\text{eff}}$ 的影响。

### 4.3 双偶然事件原则

工艺设计宜含有足够大的安全系数，使得在各种有关工艺条件中至少需要一并发生两种不大可能的、独立的改变，才可能导致临界事故。

### 4.4 几何控制

只要可能，则宜依靠限制设备几何尺寸的设计而不是行政管理措施来实施临界控制。设计设备的几何尺寸时，可以充分利用工艺材料和设备的核特性。应当在开始运行操作之前核实所有赖以实施临界控制的几何尺寸和核特性，并应当采取适当措施使它们得以保持。

### 4.5 中子吸收剂的应用

可以采用将中子吸收材料（如镉和硼）加入工艺材料或设备或者两者之中的手段来实施临界控制。应当采取适当措施使所加入的中子吸收材料持续保持其预期的分布和浓度。使用中子吸收剂的溶液时，尤其应当采取有效的控制措施。

### 4.6 次临界限值的确定

只要有合适的实验数据，则应当以实验数据为依据来建立次临界限值，并应当考虑所用数据的不确定度留有适当的裕量。在没有可以直接利用的实验测量数据的情况下，可以由计算结果导出次临界限值，但所用的计算方法应当是按照第5章的规定通过与

实验数据的比较证明为有效的。

## 5 计算方法的确认

### 5.1 一般要求

有许多计算方法适于确定系统的次临界状态。它们的依据与形式多种多样，对于核临界安全领域广大范围的各种不同情况其适用价值亦不相同，因此，对于用于核临界安全评价的计算方法，无论其依据与形式如何，均应首先遵照本章的规定确立其对被评价系统的有效性及其适用范围。

### 5.2 偏倚的确定<sup>1)</sup>

应当确定计算方法的偏倚，偏倚的确定应通过建立临界实验数据与相应实验系统计算结果之间的相关关系来进行（参见附录B）。通常，宜利用临界状态下实验系统的 $k_{\text{eff}}$ 计算值来表示计算结果与实验结果之间的相关关系，这种情况下，偏倚就是 $k_{\text{eff}}$ 的计算值相对于1的偏差。

也可以利用其他物理状态和参数，来建立实验数据与相应实验系统计算结果之间的相关关系，确定计算方法的偏倚。

应利用偏倚使计算方法在其适用范围内规范化，使得可在偏倚不确定度的限制范围内预示临界条件。偏倚及其不确定度通常不是常数，二者都可能是组分和其他变量的函数。

### 5.3 偏倚的趋向与适用范围的扩展

可以将计算方法的适用范围扩展至实验条件以外的区域，前提是利用实验条件范围内偏倚的趋向业已确定了那个区域内的偏倚。扩展的区域范围较大时，宜辅以其他计算方法，使扩展区域内偏倚（尤其是偏倚的不确定度）的估计更为可靠，并证明计算结果的一致性。

### 5.4 偏倚的不确定度与次临界度裕量

偏倚的不确定度应当涵盖相应于下述不确定度的 $k_{\text{eff}}$ （或其他相关参数）的扣除量，这些不确定度包括实验条件的不确定度、计算方法的准确度与精密度不足、适用范围的扩展所引入的不确定度等。

确定了相应于计算方法准确度与精密度和相应于偏倚及不确定度的扣除量之后，应当对 $k_{\text{eff}}$ （或其他相关参数）施以适当的次临界度裕量；该裕量应足够大，以确保用该方法所计算的情况在实际上肯定是次临界的；与偏倚及其不确定度一样，该裕量也可能随组分及其他变量变化（参见附录B和附录C）。

### 5.5 计算机程序的校验

计算方法中包含计算机程序时，应当进行校验，以证实数学运算是按预期要求进行的。对计算机程序做了修改，应当重新进行校验。

### 5.6 核特性参数

计算方法中所用的核特性参数（如截面数据）宜与其实验测量结果相一致。

### 5.7 确认报告

应当编写书面确认报告。这种报告应当：

a) 对计算方法做足够详细、清楚和确切的描述，以便他人能独立地重现其结果；

---

1) 无实验数据可以利用时，不可能确定计算方法的偏倚，因而不可能满足5.2的要求。通过与其他计算方法计算结果的比较来讲行计算方法的确认是不可以接受的。

b) 指明计算方法确认所用的实验数据，并列出由实验数据导出的参数；

c) 说明计算方法的适用范围；

d) 说明适用范围内的偏倚和次临界度裕量，并论证所确定的次临界度裕量是适当的。

## 6 易裂变核素的单参数限值

### 6.1 限值应用一般要求

6.2、6.3、6.4、6.5和6.6列出了一些易裂变核素孤立单体的单参数限值，它们是用满足第5章的要求的计算方法算出的。如果这些限值的使用条件得到满足，则遵守其中的任何一个限值，易裂变材料的操作、加工和处理就能够安全地进行。仅当能够证明单体周围的材料（包括附近其他易裂变材料）使有效增殖因子（ $k_{\text{eff}}$ ）的增加不大于紧包着该单体的无限厚水层使 $k_{\text{eff}}$ 的增加时，上述限值才允许应用。要将上述某一限值应用于易裂变核素的混合物时，应将该混合物中每一种易裂变核素均当作其中具有最小限值的那种核素来考虑。

应当强调的是，工艺规范必须留有适当的次临界度裕量，以应对工艺变量的不确定度和限值被意外超过。

### 6.2 均一水溶液

在保持均一水溶液的前提下，即保持水溶液的浓度值不超过饱和溶液值时，表1中的任一限值都可以使用。如果钚-240的浓度

大于钚-241的浓度，并在计算质量或浓度时把钚-241当作钚-239，则钚-239的限值也可用于各种钚同位素的混合物。（对于钚同位素混合物中钚-240的含量相当可观的情况，7.4规定了一些较为宽松的限值）。原子比限值与溶液浓度限值是等效的，但前者也适用于非水溶液，并且不必考虑易裂变核素的化学形式。

### 6.3 含水混合物

表1的面密度限值可用于具有任何化学组成的易裂变材料。在面密度是均一的前提下，它们对具有密度梯度的混合物也是有效的。对于可能并不均一的混合物，铀-233、铀-235和钚-239的次临界质量限值分别是0.50kg、0.70kg和0.45kg，并且与化学组成无关。

表1 易裂变核素均一水溶液的单参数限值

参 数	次临界限值				
	$^{233}\text{UO}_2\text{F}_2$	$^{233}\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$	$^{235}\text{UO}_2\text{F}_2$	$^{235}\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$	$^{239}\text{Pu}(\text{NO}_3)_4$
易裂变核素的质量/kg	0.54	0.55	0.76	0.78	0.48
溶液圆柱的直径/cm	10.5	11.7	13.7	14.4	15.4
溶液平板的厚度/cm	2.5	3.1	4.4	4.9	5.5
溶液的体积/L	2.8	3.6	5.5	6.2	7.3
易裂变核素的浓度/(g/L)	10.8	10.8	11.6	11.6	7.3
氢与易裂变核素原子数的比 <sup>a</sup>	2390	2390	2250	2250	3630
易 裂 变 核 素 的 面 密 度 / (g/cm <sup>2</sup> )	0.35	0.35	0.40	0.40	0.25
<sup>a</sup> 下限值。					

### 6.4 含水混合物的富集度限值

表2列出了与水均匀混合的铀金属和几种铀化合物的铀-235富集度限值。这里，混合物中的铀金属和铀化合物的质量或浓度不受限制。

注：计算这些限值时，将“均匀”混合物中的干 $\text{UO}_3$ 的平均粒径归一化为 $60\mu\text{m}$ 。 $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ 的二水水合物的平均粒径约为 $100\mu\text{m}$ 。硝酸盐混合物中各不同的氢与铀-235原子数的比（H/U）都是在0.32cm厚的聚乙烯球壳反射条件下得到的。

表2 与水均匀混合的铀金属和几种铀化合物的铀-235富集度限值

金属或化合物	$^{235}\text{U}$ 富集度限值/%
铀金属	0.93
$\text{UO}_2$ ， $\text{U}_3\text{O}_8$ 或 $\text{UO}_3$	0.96
$\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$	1.96

### 6.5 金属单体

表3列出的质量限值和铀富集度限值适用于无凹面的单个部件，并可推广适用于单个小部件堆，条件是小部件之间无散置的慢化材料。

如果计算质量时把铀-234当作铀-233或铀-235，则铀-233和铀-235的限值也适用于铀-233或铀-235与铀-234、铀-236或铀-238的混合物。如果钚-240的浓度大于钚-241的浓度，并在计算质量时把所有钚同位素都当作钚-239，则钚-239的限值也适用于钚同位素的混合物。可以按同位素组成对密度限值进行调整。

表3 金属单体的单参数限值

参 数	次临界限值		
	<sup>233</sup> U	<sup>235</sup> U	<sup>239</sup> Pu
易裂变核素的质量/kg	6.0	20.1	5.0
圆柱直径/cm	4.5	7.3	4.4
平板厚度/cm	0.38	1.3	0.65
铀的 <sup>235</sup> U富集度质量分数/%	—	5.0	—
质量和尺寸限值有效时的最大密度/（g/cm <sup>3</sup> ）	18.65	18.81	19.82

6.6 氧化物

表4和表5的限值仅适用于水的质量分数低于1.5%的氧化物。其中的质量限值适用于无凹面的单个部件，并可推广应用于单个小部件堆，条件是小部件之间无附加的散置慢化材料。

以核素质量和以氧化物（包括湿气）质量给出的质量限值是等效的。应该强调的是，表4和表5中的限值只有在规定的整体密度限制得到满足的条件下才可以使用<sup>2)</sup>。当水的质量分数限制在1.5%以下时，表2中的铀氧化物的<sup>235</sup>U富集度限值可以增加至3.2%。

7 多参数控制

7.1 限值应用一般要求

7.1～7.4给出了特别有用的几个多参数控制例子。这些限值都是用满足第5章的要求的计算方法算出的。仅当能够证明系统周围的材料使有效增殖因子（ $k_{\text{eff}}$ ）的增加不大于紧包着该系统的无限厚水层使 $k_{\text{eff}}$ 的增加时，上述限值才允许应用。

应当强调的是，工艺规范必须留有适当的次临界度裕量，以应对工艺变量的不确定度和某一限值被意外超过。

2) 使用者应当注意，材料（特别是UO<sub>3</sub>）的密度可能会超过表4中的全密度，表4中的限值对于高度压实的氧化物是不适用的。

表4 水质量分数不大于1.5%的全密度氧化物的单参数限值

参 数	<sup>233</sup> UO <sub>2</sub>	<sup>233</sup> U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	<sup>233</sup> UO <sub>3</sub>	<sup>235</sup> UO <sub>2</sub>	<sup>235</sup> U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	<sup>235</sup> UO <sub>3</sub>	<sup>239</sup> PuO <sub>2</sub>
易裂变核素质量/kg	10.1	13.4	15.2	32.3	44.0	51.2	10.2
氧化物的质量 <sup>a</sup> /kg	11.7	16.0	18.7	37.2	52.8	62.6	11.5
圆柱的直径/cm	7.2	9.0	9.9	11.6	14.6	16.2	7.2
平板的厚度/cm	0.8	1.1	1.3	2.9	4.0	4.6	1.4
限值有效的最大整体密度 <sup>b</sup> /（g/cm <sup>3</sup> ）	$\frac{9.38}{1-0.085(1.5-\omega)}$	$\frac{7.36}{1-0.065(1.5-\omega)}$	$\frac{6.56}{1-0.056(1.5-\omega)}$	$\frac{9.44}{1-0.086(1.5-\omega)}$	$\frac{7.41}{1-0.065(1.5-\omega)}$	$\frac{6.60}{1-0.057(1.5-\omega)}$	$\frac{9.92}{1-0.091(1.5-\omega)}$
<sup>a</sup> 包括所含水的质量，水的最大含量小于其质量分数限定值1.5%。 <sup>b</sup> $\omega$ 代表氧化物中以质量分数计的含水量。							

表5 水质量分数不大于1.5%的不大于半密度<sup>a</sup>的氧化物的单参数限值

参 数	<sup>233</sup> UO <sub>2</sub>	<sup>233</sup> U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	<sup>233</sup> UO <sub>3</sub>	<sup>235</sup> UO <sub>2</sub>	<sup>235</sup> U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	<sup>235</sup> UO <sub>3</sub>	<sup>239</sup> PuO <sub>2</sub>
易裂变核素的质量/kg	23.4	30.5	34.7	88	122	142	27
氧化物的	27.0	36.6	42.4	102	146	174	30

质量 <sup>b</sup> /kg							
圆 柱 的 直 径/cm	11.9	14.8	16.3	20.4	26.0	28.8	12.6
平 板 的 厚 度/am	1.6	2.2	2.6	5.8	8.0	9.3	2.8
<sup>a</sup> 半密度指表4中最大整体密度的一半。 <sup>b</sup> 包括所含水的质量，水的最大含量小于其质量分数限定值1.5%。							

7.2 低富集度的金属铀-水混 合物和铀氧化物-水混合物

多参数控制的一种用法是同时控制铀的铀-235富集度和第6章中规定的一个参数。图1～图5分别给出了铀水栅的铀-235质量、圆柱直径、平板厚度、体积和面密度等参数的次临界限值与富集度的关系，它们适用于各种尺寸和各种形状的铀金属或铀氧化物（UO<sub>2</sub>）小块与水组成的系统。

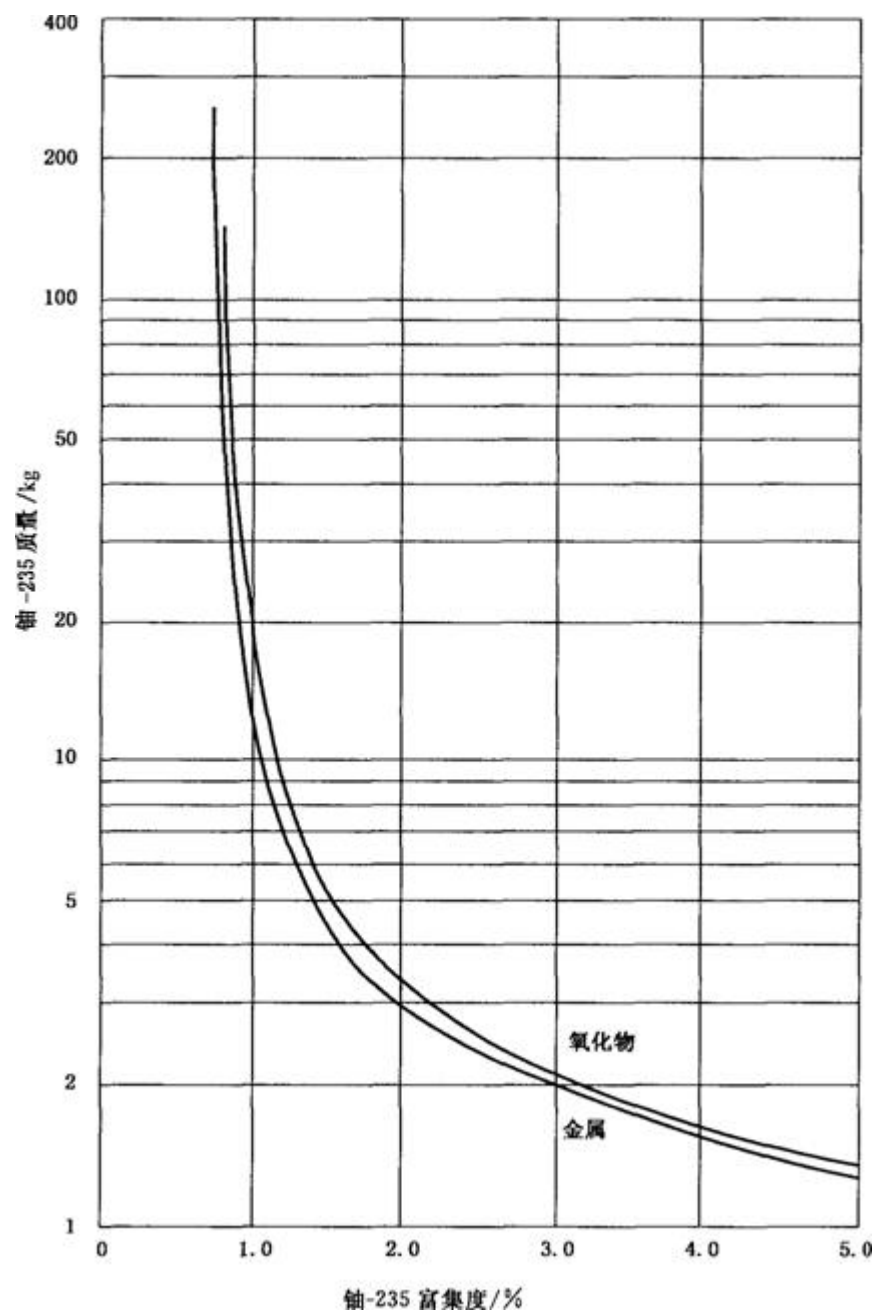


图1 铀水栅的质量限值



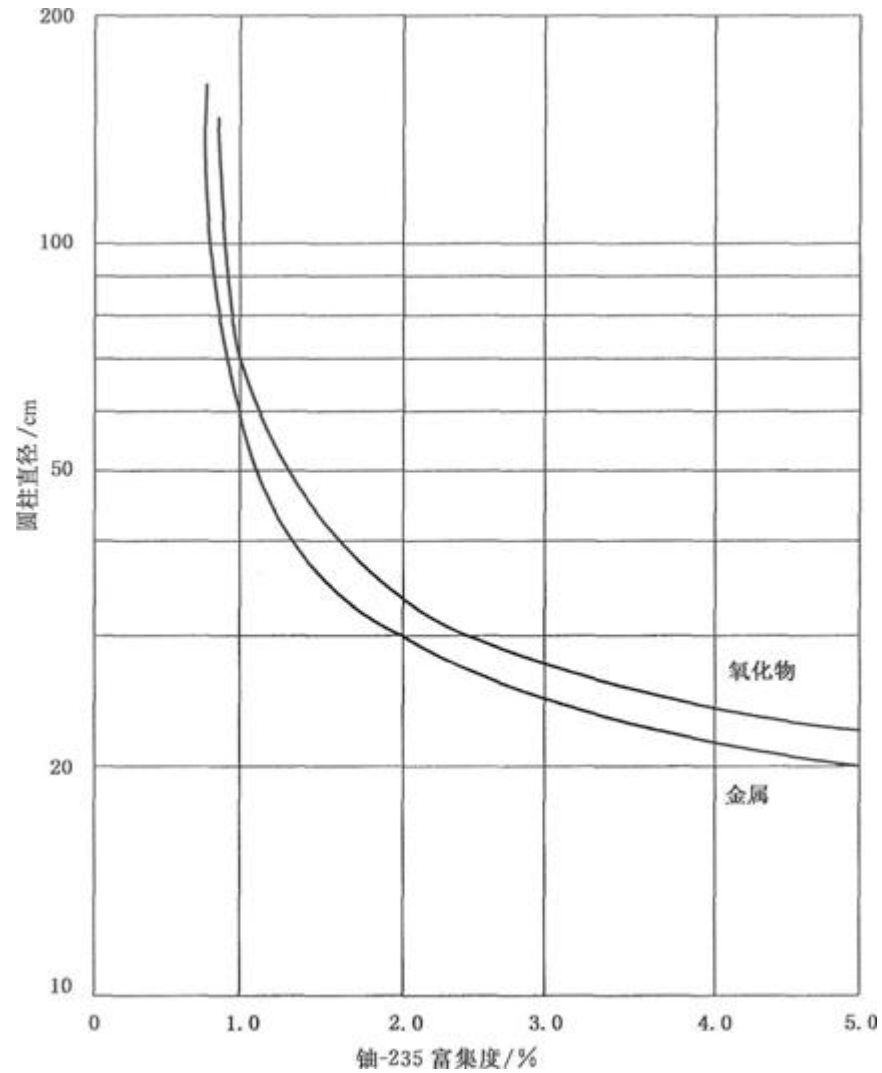


图2 铀水栅的圆柱直径限值

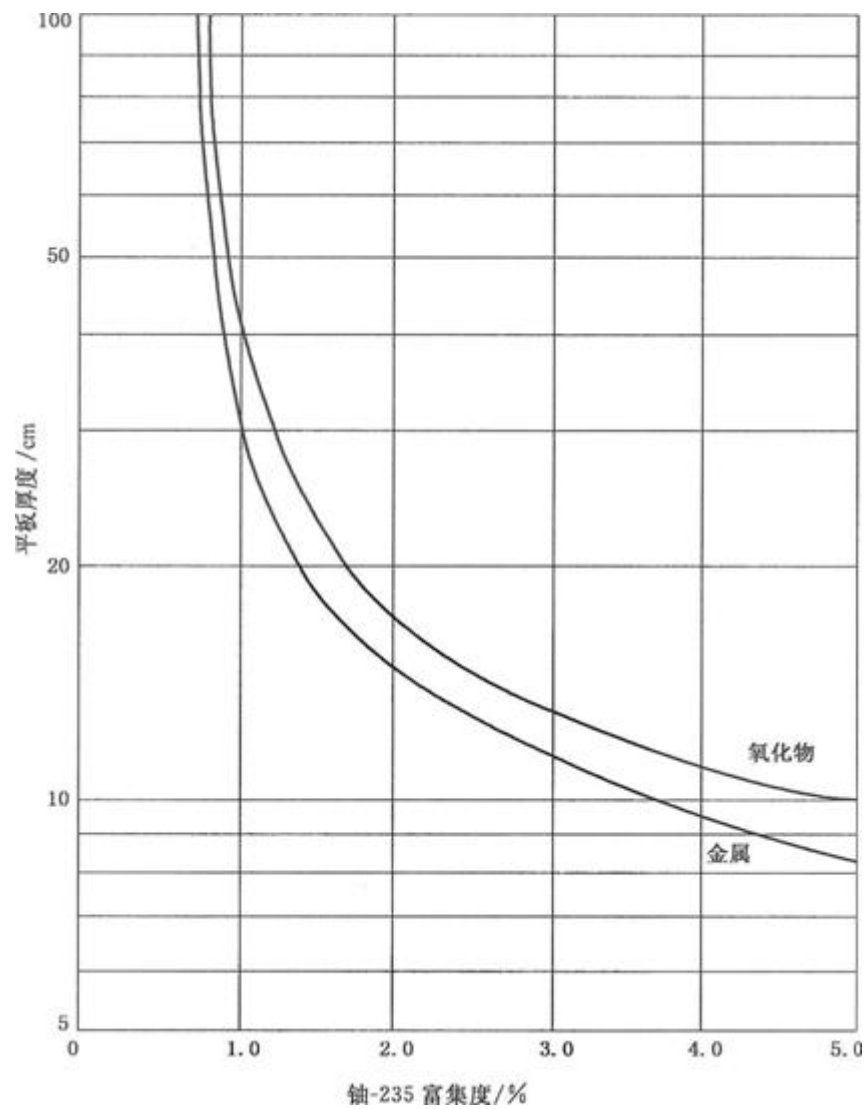


图3 铀水栅的平板厚度限值

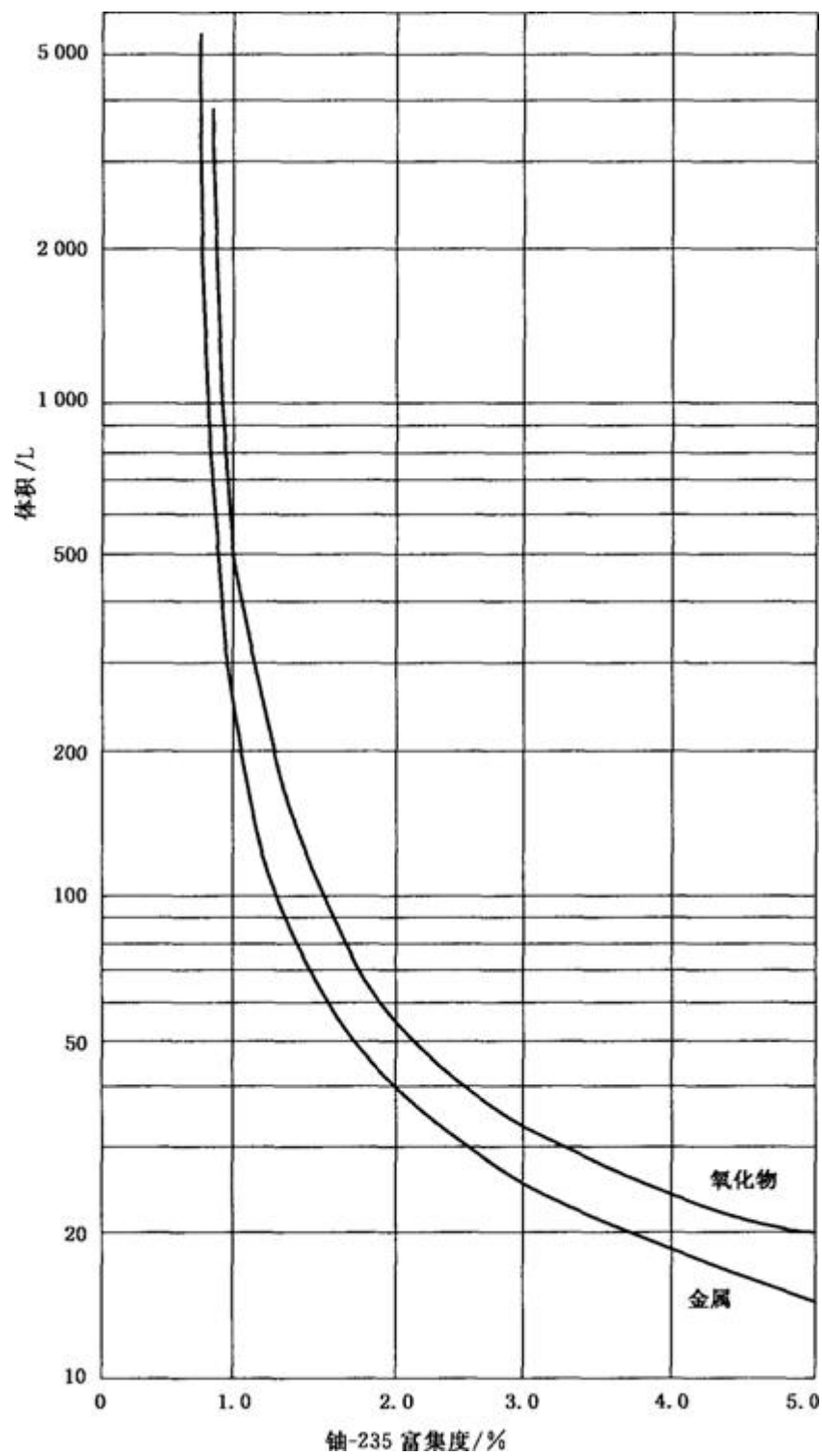


图4 铀水栅的体积限值

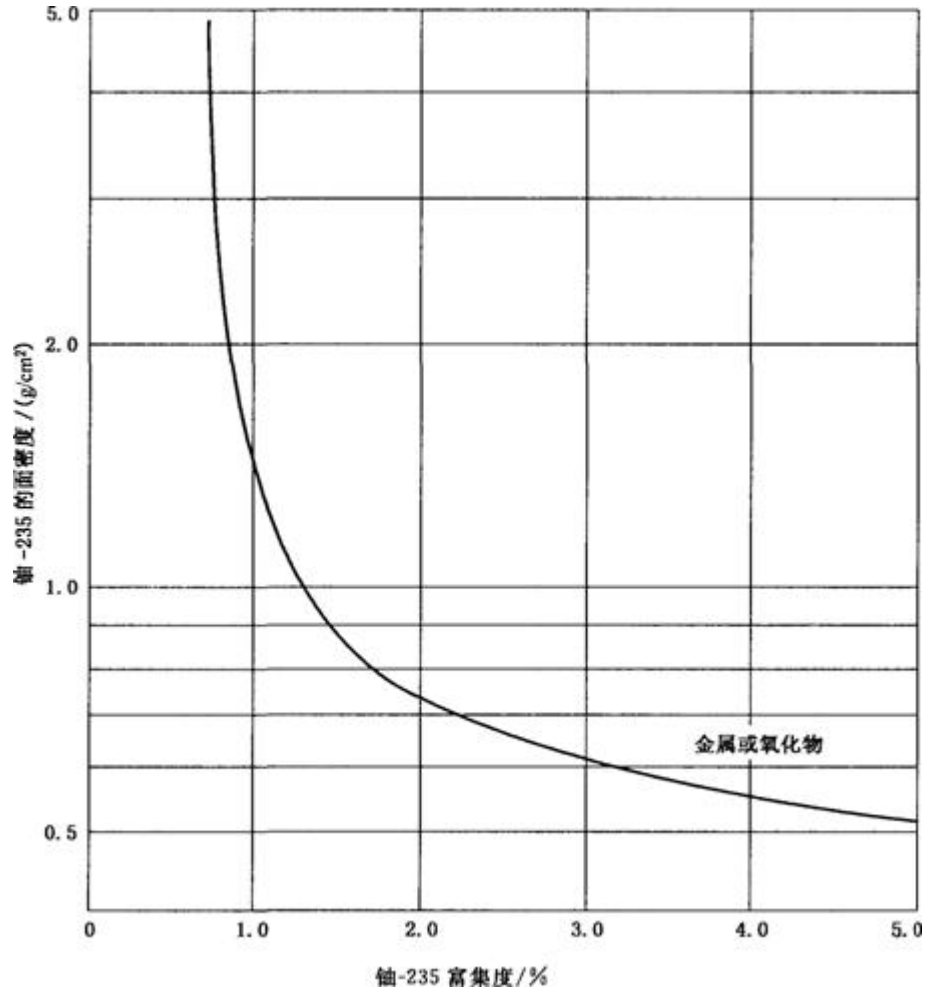


图5 铀水栅的面密度限值

### 7.3 低<sup>235</sup>U富集度铀的水溶液

多参数控制的另一种应用是对于保持均一的铀的水溶液同时控制铀的铀-235富集度和表1中规定的一个参数。表6列出了将富集度控制在所规定的限值以下时，铀的均一水溶液参数的次临界限值。这里，铀的均一水溶液的浓度不得超过其饱和溶液的浓度（对于UO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>，其饱和水溶液的浓度值取5mol/L，对于UO<sub>2</sub>（NO<sub>3</sub>）<sub>2</sub>溶液，取2.5mol/L）。

表6 低富集度铀的均一水溶液的次临界限值

参 数	<sup>235</sup> U富集度/%	次临界限值	
		UO <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub> （NO <sub>3</sub> ） <sub>2</sub>
<sup>235</sup> U质量/kg	10.0	1.07	1.47
	5.0	1.64	3.30
	4.0	1.98	6.50
	3.0	2.75	—
	2.0	8.00	—

表6（续）

参 数	<sup>235</sup> U富集度/%	次临界限值	
		UO <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub> （NO <sub>3</sub> ） <sub>2</sub>
圆柱直径/cm	10.0	20.1	25.2
	5.0	26.6	42.7
	4.0	30.2	58.6
	3.0	37.4	—
	2.0	63.0	—
平板厚度/cm	10.0	8.3	11.9
	5.0	12.6	23.4
	4.0	15.1	33.7

体积/L	3.0	20.0	—
	2.0	36.5	—
	10.0	14.8	26.7
	5.0	30.6	111.0
	4.0	42.7	273.0
	3.0	77.0	—
	2.0	340.0	—
铀的浓度/（g/L）	10.0	123.0	128.0
	5.0	261.0	283.0
	4.0	335.0	375.0
	3.0	470.0	—
	2.88	—	594.9 <sup>a</sup>
	2.0	770.0	—
	1.45	1190.0 <sup>a</sup>	—
<sup>a</sup> 饱和溶液。			

7.4 含钚-240的Pu（NO<sub>3</sub>）<sub>4</sub>均一水溶液

对于含<sup>240</sup>Pu的Pu（NO<sub>3</sub>）<sub>4</sub>均一水溶液，可以按照钚中<sup>240</sup>Pu同位素的丰度，将表1中Pu（NO<sub>3</sub>）<sub>4</sub>溶液的限值加大。但其增加量受制于<sup>241</sup>Pu的丰度。表7列出了三组不同同位素组分的Pu（NO<sub>3</sub>）O<sub>4</sub>均一水溶液的次临界限值。计算同位素组分时，应当将所存在的<sup>238</sup>Pu和<sup>242</sup>Pu忽略。

对于钚与天然铀完全混合的情况，其限值可进一步放宽。此种情况下的限值详见GB/T 15146.5。

表7 含钚-240的Pu（NO<sub>3</sub>）<sub>4</sub>均一水溶液的次临界限值

参 数	次临界限值		
	<sup>240</sup> Pu的质量分数≥5% <sup>241</sup> Pu的质量分数≤1%	<sup>240</sup> Pu的质量分数≥15% <sup>241</sup> Pu的质量分数≤6%	<sup>240</sup> Pu的质量分数≥25% <sup>241</sup> Pu的质量分数≤15%
钚的质量/kg	0.57	0.78	1.02
圆柱直径/cm	17.4	19.5	21.3
平板厚度/cm	6.7	8.0	9.2

表7（续）

参 数	次临界限值		
	<sup>240</sup> Pu的质量分数≥5% <sup>241</sup> Pu的质量分数≤1%	<sup>240</sup> Pu的质量分数≥15% <sup>241</sup> Pu的质量分数≤6%	<sup>240</sup> Pu的质量分数≥25% <sup>241</sup> Pu的质量分数≤15%
体积/cm <sup>3</sup>	10.0	13.6	17.2
钚的浓度/（g/L）	7.8	8.9	10.2
氢与钚原子数的比	3400	2980	2600
钚的面密度/（g/cm <sup>2</sup> ）	0.28	0.34	0.4

7.5 含钚-240的钚与水的混合物

对于PuO<sub>2</sub>形式的钚与水的混合物（可以是非均匀的），在钚-240和钚-241同位素组分的限制条件与表7相同的情况下，钚的次临界质量限值按照钚-240丰度递增的次序依次为0.53kg、0.74kg和0.99kg。

按照GB 15146.1的要求，应当周密地确定每一工艺过程在正常和可信异常工况下都是次临界的，并应弄清哪些工况下 $k_{\text{eff}}$ 最大。下面是一些值得考虑的造成工艺条件变化的典型例子。

- A.1 由于容器凸胀、腐蚀或破裂，或制造时不符合技术条件，造成容器偏离所设计的形状或尺寸。
- A.2 由于误操作、标签不当、设备故障、或样品分析操作出错，造成某一位置的易裂变材料质量增加。
- A.3 由于下列原因造成慢化剂与易裂变材料原子数之比偏离规定值：
- a) 仪器或化学分析方法不准确；
  - b) 水、油、雪（即低密度的水）、纸板、木料或其他慢化材料，以淹没、喷淋或以其他方式影响单体或多体系统；
  - c) 慢化剂蒸发或转移；
  - d) 溶液中易裂变材料沉淀；
  - e) 添加慢化剂造成浓溶液稀释；
  - f) 空气泡进入贮存水池内的燃料组件排之间。
- A.4 由于下列原因造成中子损失份额改变：
- a) 固态中子吸收体因腐蚀或浸出而损失；
  - b) 慢化剂数量改变；
  - c) 溶液中的中子吸收剂或易裂变材料因沉淀而重新分布；
  - d) 慢化剂阵列或溶液中的固态中子吸收体因聚集而重新分布；
  - e) 加到溶液中的中子吸收剂未达到规定的数量，或者未达到规定的分布方式；
  - f) 样品分析技术未能提供正确的浓度数据。
- A.5 由于下列原因造成反射效率改变：
- a) 出现额外材料（例如水或人体）使反射体厚度增加；
  - b) 反射体组分变化，使中子吸收剂减少（例如因吸收剂包壳被腐蚀）。
- A.6 由于下列原因造成单体之间、单体与反射层之间的相互作用改变：
- a) 出现额外的单体或反射体（例如人体）；
  - b) 单体放置位置不当；
  - c) 单体间的慢化剂和吸收剂损失；
  - d) 保持单体间隔的架子坍塌。
- A.7 易裂变材料密度增加。

**附 录 B**  
**（资料性附录）**  
**计算方法确认示例**

本附录给出的示例是虚构的，借以说明如何按照第5章的要求进行计算方法的确认。其中的 $^{292}\text{Fi}$ 是一种虚构的易裂变核素。

- B.1 问题  
确认一种用于计算水反射的 $^{292}\text{Fi}$ 溶液次临界质量限值的计算方法，溶液的 $^{292}\text{Fi}$ 浓度为 $2\text{g/L}\sim 32\text{g/L}$ ，形状不限。
- B.2 计算方法

所选用的方法由适用于球形系统的XYZ计算机程序和一组三群截面组成。溶液盛放在带水反射的球形薄壳容器中。容器壳的核特性与水的核特性没有明显的差别。

可供利用的临界实验数据如表B.1所示。

**表B 1 可供利用的临界实验数据**

$^{292}\text{Fi}$ 的浓度 $\rho/(\text{g/L})$	临界半径/cm
2	19.9
8	10.7
16	10.2

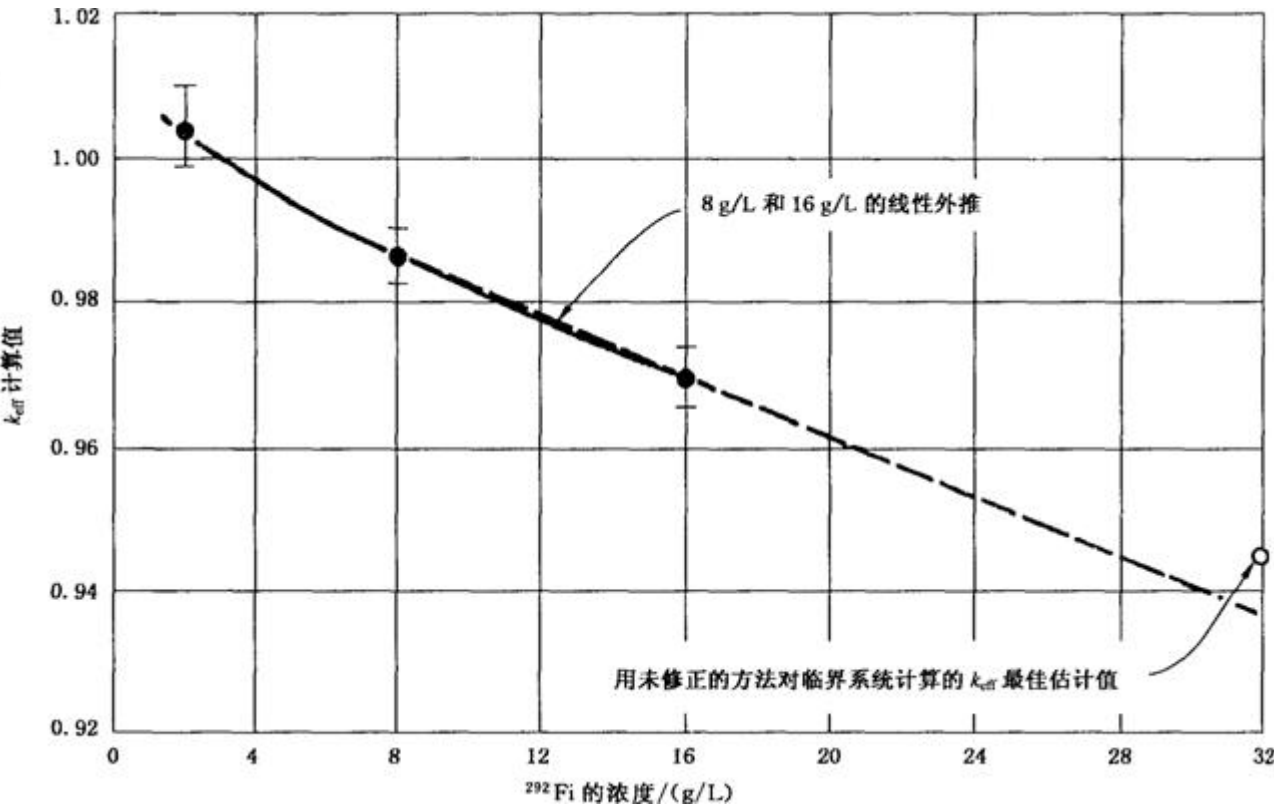
- B.3 确认
- B.3.1 将XYZ程序装入当地计算机。用该程序计算程序本身所带的例题。将所得结果与程序原编制者利用该程序计算同一例题所得到的结果进行比较。结果表明，该程序能在当地计算机上正确地计算多区球形系统。
- B.3.2 对三个实验点进行计算。所得结果如表B.2所示。表中标出的误差是由实验数据的误差带来的。

**表B.2 对三个实验点的计算结果**

$^{292}\text{Fi}$ 的浓度 $\rho/(\text{g/L})$	$k_{\text{eff}}$

2	$1.0046 \pm 0.0057$
8	$0.9864 \pm 0.0041$
16	$0.9696 \pm 0.0041$

所作的计算收敛到 $k_{\text{eff}}$ 的计算误差为 $\pm 0.0001$ ，这一误差与实验误差相比是很小的。在实验数据所覆盖的 $^{292}\text{Fi}$ 的浓度范围（2g/L~16g/L）内， $k_{\text{eff}}$ 的计算值近似于浓度的线性函数，而且似无理由会偏离光滑曲线。需要将计算方法的适用范围扩展到 $^{292}\text{Fi}$ 的浓度为32g/L的区域。在 $^{292}\text{Fi}$ 的浓度2g/L~16g/L之间， $k_{\text{eff}}$ 与浓度的关系曲线呈轻微的凹状（见图B.1）。因此，可以预期，将 $^{292}\text{Fi}$ 的浓度为8g/L和16g/L两点的 $k_{\text{eff}}$ 计算值线性外推到 $^{292}\text{Fi}$ 的浓度为32g/L处，所得到的 $k_{\text{eff}}$ 估计值可能明显偏小，如图B.1所示。线性外推所得到的结果是 $k_{\text{eff}}=0.936$ 。显然，这种大范围的外推，需要另找支持性数据。



图B.1 临界实验系统 $k_{\text{eff}}$ 的计算值与 $^{292}\text{Fi}$ 浓度的关系

B.3.3 鉴于计算出的 $k_{\text{eff}}$ 随浓度的增加而偏小，进行了研究以查明原因。研究的结果发现： $^{292}\text{Fi}$ 的超热俘获截面的不确定度很大，这可能是造成 $k_{\text{eff}}$ 计算结果随浓度增加而偏小的原因。将超热俘获截面调小20%，重新进行计算，所得到的结果如表B.3所示。这一修改使 $k_{\text{eff}}$ 随浓度的增加而出现的偏移变得最小，预计在 $^{292}\text{Fi}$ 的浓度为32g/L处的 $k_{\text{eff}}$ 值大约为1.01。

表B.3 超热截面减小20%后的计算结果

$^{292}\text{Fi}$ 的浓度 $\rho$ / (g/L)	$k_{\text{eff}}$
2	1.0109
8	1.0084
16	1.0106

B.3.4 对 $^{292}\text{Fi}$ 的浓度为32g/L的系统完成如表B.4所列出的计算。表中数据表明，对于两个系统的计算结果，其反应性差或相对偏差为 $\delta k_{\text{eff}}/k_{\text{eff}}=0.068 \pm 0.002$ 。

表B.4 对 $^{292}\text{Fi}$ 浓度为32g/L系统的计算结果

--	--	--

半径/cm	$k_{\text{eff}}$ ( $^{292}\text{Fi}$ 的原始截面)	$k_{\text{eff}}$ ( $^{292}$ 的超热截面减小20%)
12.429	1.0000	1.0708
11.274	0.9343	1.0000

B.3.5 以修改后的参数计算 $^{292}\text{Fi}$ 的浓度为32g/L的临界系统给出的 $k_{\text{eff}}=1.01$ （见B.3.3）为基础，利用表B.4中的数据进行线性内插，可以求出用未修改的方法（即使用XYZ程序和未修改的截面数据）计算 $^{292}\text{Fi}$ 的浓度为32g/L的水反射溶液临界系统时，给出的 $k_{\text{eff}}$ 值为0.9443。

B.3.6 因此，在 $^{292}\text{Fi}$ 的浓度 $\rho$ 为2g/L< $\rho$ <32g/L范围内，可以估计出计算方法（即使用未修改截面数据的XYZ程序）的偏倚如表B.5所示。

**表B.5 偏倚的估计值**

$^{292}\text{Fi}$ 的浓度 $\rho$ /（g/L）	偏倚
2	+0.0046
8	−0.0136
16	−0.0304
32	0.0557

B.3.7 在 $^{292}\text{Fi}$ 的浓度2g/L～16g/L范围内，偏倚的不确定度主要来源于参数的实验误差（有部分不确定度与内插有关）。在 $^{292}\text{Fi}$ 的浓度为32g/L处，偏倚的不确定度还应包括由外推引入的所有误差。根据 $k_{\text{eff}}$ 的裕量应足以补偿偏倚的不确定度，并确保系统处于次临界状态的要求，通过分析和判断，确定 $k_{\text{eff}}$ 的裕量如下：

- 在 $^{292}\text{Fi}$ 的浓度为2g/L～16g/L范围内，为0.03；
- 在 $^{292}\text{Fi}$ 的浓度为32g/L处，为0.05。

因此，对于 $^{292}\text{Fi}$ 的浓度分别为2g/L、8g/L、16g/L和32g/L的溶液，由该计算方法计算出的 $k_{\text{eff}}$ 值分别不大于0.9746、0.9564、0.9396和0.8943的任何系统，可以肯定都是次临界的。

### 附 录 C

#### （资料性附录）

#### 关于计算方法的讨论

本附录对计算方法的讨论旨在于说明第5章中的各项要求。

#### C.1 使用计算方法的目的

使用计算方法的目的在于通过内插和外推来补充实验数据。

#### C.2 背景知识

校验是指证实所安装的计算机程序能够正确地完成预期数值计算的过程。

基准是指一种描述充分的、可以用于确定计算方法的可靠性的临界实验结果。

确认是指利用适合于预期的操作评价的基准来确定计算方法的适用性和确立该方法的偏倚的过程。

#### C.3 讨论

在核临界安全评价中应用分析计算方法去预计中子增殖因子时，对于该种应用所计算出的增殖因子 $k_{\text{p}}$ ，加上其不确定度 $|\Delta k_{\text{p}}|$ ，应当小于或等于对该种应用所建立的中子增殖因子的次临界限值 $k_{\text{a}}$ ，即：

$$k_{\text{p}}+|\Delta k_{\text{p}}|\leqslant k_{\text{a}}$$

$k_{\text{a}}$ 是确认过程的结果，可以表示为：

$$k_{\text{a}}=k_{\text{c}}-|\Delta k_{\text{c}}|-|\Delta k_{\text{m}}|$$

其中：

$k_{\text{c}}$ 等于利用特定计算方法对基准临界实验进行计算所得 $k_{\text{eff}}$ 的平均值。如果对基准临界实验所计算的增殖因子有随某一参数变化的趋势，则应根据计算值的最佳拟合来确定 $k_{\text{c}}$ 。计算志 $k_{\text{c}}$ 时作为基准使用的临界实验宜具有与被评价系统相似的材料组分（易裂变材料、中子吸收材料与慢化材料）、几何构型、中子能谱，以及核特性（包括反射层的核特性）。 $k_{\text{c}}$ 与实验测量的 $k_{\text{eff}}$ 之间的差被定义为偏倚。偏倚可能是组分与其他变量的函数，因此宜考察其变化趋势。

$\Delta k_{\text{c}}$ 等于考虑 $k_{\text{c}}$ 的偏倚和偏倚的不确定度所施加的裕量<sup>3)</sup>，该裕量应涵盖相应于下列不确定度的 $k_{\text{eff}}$ 扣除量：

a) 临界实验数据的不确定度；



- b) 计算 $k_c$ 的统计或收敛不确定度，或者这两者；
- c)  $k_c$ 外推至实验数据范围以外所引入的不确定度；
- d) 计算方法中所用的几何条件或材料表示方法的局限性所引入的不确定度。  
 $\Delta k_m$ 等于为确保 $k_a$ 的次临界度，根据判断所施加的裕量。  
 $k_p$ 等于对被评价系统的正常与可信的异常条件或事件情况所计算的有效增殖因子 $k_{eff}$ 。  
 $\Delta k_p$ 等于相应于下列不确定度的扣除量：
  - a) 计算 $k_p$ 的统计或收敛不确定度，或者这两者；
  - b) 计算方法中所用的几何条件或材料表示方法的局限性所引入的不确定度。宜利用适当的统计模型将各种不确定度加以整合。

3) 在DOE G 421.1-1的附录F-F.5中的表述为：“ $\Delta k_c$ =补偿 $k_c$ 的不确定度的裕量，该裕量应涵盖……”。

C.4 适用范围的扩展

- 可以将计算方法的适用范围扩展到实验条件的范围以外，前提是利用实验条件范围内偏倚的趋向已经确定了那个区域内的偏倚。扩展的区域较大时，宜：
- a) 研究材料、几何条件或中子能谱的个别变化对偏倚和可能的偏倚抵消的影响。此研究允许单独确认可能影响适用范围扩展的变化。这可以用分步进行的方法来实现。即在可能的情况下，增加一个新的参数来选择计算方法的确认所用的基准，使所选择的实验与原先的实验不同，从而观察这个新参数对偏倚的影响。
  - b) 用另外一种可用的方法，对扩展的适用范围内的偏倚进行独立的估计，以补充被确认的计算方法。

C.5 报告

为满足5.7的要求，需要完成下列工作：

- a) 说明被确认的计算方法（即计算机程序及所用的选项、选择网格点的方法、截面数据和描述输入所需要的所有数值参数）；
- b) 描述用于确定实验数据的材料组分原子密度的分析模型（及固有偏倚）；
- c) 说明确定参数限值 $k_p$ 的依据，并说明下式右侧各项的可靠性，
$$k_p \leq k_c - |\Delta k_c| - |\Delta k_m| - |\Delta k_p|;$$
- d) 说明并展示为确定偏倚、适用范围和参数限值在确认过程中所使用的独立和相依参数之间的关系与趋势。

参 考 文 献

[1] GB 15146.1—2008 反应堆外易裂变材料的核临界安全 第1部分：核临界安全行政管理规定  
[2] DOE G 421.1-1: 1999 美国能源部 良好实践导则

---