

核安全导则 HAD501/09-2022

# 核燃料后处理厂核材料衡算

国家核安全局 2022 年 11 月 18 日批准发布

国家核安全局

# 核燃料后处理厂核材料衡算

(2022年11月18日国家核安全局批准发布)

本导则自发布之日起实施

本导则由国家核安全局负责解释

本导则是指导性文件。在实际工作中可以采用不同于本导则的方法或方案,但必须证明所采用的方法或方案至少具有与本导则相同的安全水平。

本导则的附件与正文具有同等效力。

# 目 录

1. 总则.....	1
1.1 目的 .....	1
1.2 范围 .....	1
1.3 总体要求 .....	1
2. 核材料衡算组织机构.....	2
2.1 核材料衡算组织机构组成 .....	2
2.2 核材料管制办公室职责 .....	2
2.3 核材料衡算管理组职责 .....	2
3. 核材料平衡区和物项控制区.....	3
3.1 核材料平衡区 (Material Balance Area, MBA) .....	3
3.2 关键测量点 .....	3
3.3 物项控制区 (Item Control Area, ICA) .....	4
4. 核材料管理.....	4
4.1 核材料管理的起点与终点 .....	4
4.2 核材料调入 .....	4
4.3 核材料调出 .....	5
4.4 核材料内部转移 .....	5
4.5 核材料贮存 .....	5
4.6 放射性废物管理 .....	5
5. 核材料测量.....	6
5.1 测量范围 .....	6
5.2 核材料测量方案和测量系统 .....	6
5.3 测量方法 .....	6
6. 测量系统的质量控制.....	7
6.1 测量系统质量控制的目的 .....	7
6.2 测量系统的质量控制目标 .....	7
6.3 测量系统的质量控制标准 .....	7
6.4 测量系统的质量控制管理 .....	7
6.5 标样的制备和使用 .....	8
6.6 人员要求 .....	8
7. 核材料实物盘存.....	8
7.1 盘存规程 .....	8
7.2 盘存时间 .....	8
7.3 盘存的组织及实施 .....	8
8. 核材料衡算管理及评价.....	10
8.1 核材料衡算及评价的条件 .....	10
8.2 衡算管理 .....	11
8.3 衡算评价 .....	11
9. 核材料衡算帐目与报告.....	11
9.1 运行记录 (源数据) .....	12

---

9.2 衡算记录（帐目） .....	12
9.3 衡算报告 .....	12
附录一 闭合材料平衡 MUF 的相对标准偏差限值.....	14
附录二 核材料总体测量方法误差限值推荐值 .....	15
附录三 核材料元素浓度取样误差限值推荐值 .....	16
附录四 铀元素浓度测量方法误差限值推荐值 .....	17
附录五 钚元素浓度测量方法误差限值推荐值 .....	18
附录六 后处理厂 MUF 相对标准偏差推荐计算方法.....	19

# 1. 总则

## 1.1 目的

为了对核燃料后处理厂核材料衡算管理提供技术指导，依据《中华人民共和国核材料管制条例》（以下简称《条例》）和《中华人民共和国核材料管制条例实施细则》（以下简称《实施细则》），结合我国核材料衡算的经验，制定《核燃料后处理厂核材料衡算》。

本导则强调核材料衡算数据的可追溯性和技术支持文件的完整性，是对《条例》及其《实施细则》有关条款的说明和补充。

## 1.2 范围

本导则适用于普雷克斯流程核燃料后处理厂（以下简称“后处理厂”）的乏燃料接收、卸料、贮存以及向工艺区的转运，后处理首端，化学分离和纯化，铀、钚尾端，铀、钚产品贮存和放射性废物处理的核材料衡算管理。本导则所指核材料为铀和钚。

## 1.3 总体要求

（1）应建立专职机构或指定专人负责保管核材料，严格交接手续，建立帐目与报告制度，保证帐物相符。

（2）应设置核材料衡算平衡区和物项控制区以满足对核材料定位、识别、盘存和控制的要求，及时探知核材料的丢失。平衡区边界应尽量与实体边界相一致，便于核材料准确测量，避免互相交叉，有利于采用封隔/监视措施。

（3）应建立核材料衡算制度和测量系统，应采用批准的分析测量方法和标准，达到规定的衡算误差要求，保持核材料收支平衡。

（4）应开展核材料实物盘存和核材料衡算工作。核材料记录与衡算报告应完整、及时、准确、规范，数据应具有可追溯性。记录系统应及时反映后处理厂中核材料的动态分布。

（5）应切实做好核材料及有关文件、资料的安全保密工作。凡涉及国家秘密的文件、资料，要按照国家保密规定，准确划定密级，制定严格的保密制度，防止失密、泄密和窃密。

## 2. 核材料衡算组织机构

### 2.1 核材料衡算组织机构组成

后处理厂应确定一名厂级领导或其授权人员全面负责核材料衡算管理工作，归口协调各有关部门的衡算管理活动，组织制定与批准核材料衡算管理规章制度并定期监督检查执行情况。后处理厂应建立核材料管制办公室，至少应指定1名专人负责。下设核材料衡算管理组，核材料衡算管理组成员应由后处理厂各核材料平衡区负责人和管理人员组成。

### 2.2 核材料管制办公室职责

核材料管制办公室在核材料衡算方面的主要职责是：

- (1) 实现全厂核材料衡算管理目标；
- (2) 制定核材料衡算测量方案并在方案变更时进行备案；
- (3) 制订全厂核材料衡算管理的规章制度、工作计划及实施程序；
- (4) 负责与国家核安全局联系，为监督检查提供行政、技术上的支持；
- (5) 收集、核实、处理和保存原始衡算数据及记录，编制衡算报告；
- (6) 制定各种测量的误差要求和质量管理要求；
- (7) 组织和实施各核材料平衡区的实物盘存，对核材料进行不明损失量（Material Unaccounted For, MUF）评价；
- (8) 负责对核材料衡算相关人员的培训和考核。

### 2.3 核材料衡算管理组职责

核材料衡算管理组负责执行核材料管制办公室的各项规章制度和指令。其主要职责是：

- (1) 负责核材料的测量和计数；
- (2) 组织填写和核实交接单据，填写核材料的内部转移文件；
- (3) 参加实物盘存；
- (4) 建立平衡区衡算帐目，提交平衡区实物存量和存量变化数据。

### 3. 核材料平衡区和物项控制区

#### 3.1 核材料平衡区（Material Balance Area, MBA）

##### 3.1.1 平衡区划分原则

- （1）平衡区的大小应便于核材料准确测量，以利于核材料衡算管理；
- （2）应尽量与实体边界相一致，平衡区之间应避免互相交叉；
- （3）应有利于采用封隔/监视措施，以减少测量工作量和保证核材料流量测量的完整性；
- （4）应考虑工艺流程、物料放射性及核材料形态等因素；
- （5）平衡区的划分应考虑企业商业敏感数据的保密性。

##### 3.1.2 平衡区划分

后处理厂应根据上述原则科学合理的划分平衡区。至少应设置三个平衡区：乏燃料元件贮存和后处理首端工艺区(MBA1),化学分离和纯化工艺区(MBA2),铀、钚产品贮存区(MBA3)。

（1）乏燃料元件贮存和后处理首端工艺区（MBA1），主要包括：乏燃料运输容器和容器贮存室；乏燃料贮存水池、乏燃料剪切（去壳）和废包壳和端头整备；乏燃料溶解器及输入衡算计量槽；其他辅助设备。

（2）化学分离和纯化工艺区（MBA2），主要包括：化学分离和纯化处理生产线；硝酸铀、钚浓集和贮存设备；铀、钚转化和准备单元等。

（3）铀、钚产品贮存区（MBA3），主要包括：铀、钚产品贮存设备。

#### 3.2 关键测量点

（1）关键测量点是确定核材料流量或存量的部位，设置在核材料存在形态便于测量的部位。关键测量点分为流动关键测量点和盘存关键测量点。流动关键测量点用阿拉伯数字表示，盘存关键测量点用大写英文字母表示。

（2）后处理厂至少应在进出平衡区的位置设置流动关键测量点，如流出物等，并结合工艺过程、物料化学形态、衡算要求等因素，合理增加流动关键测量点。

（3）后处理厂应根据工艺过程、设备布局、衡算要求等情况，合理设置盘存关键测量点。盘存关键测量点至少应包含：乏燃料组件贮存水池、含有核材料

溶液的暂存槽、分析实验室、产品贮存设备等。

### 3.3 物项控制区(Item Control Area, ICA)

后处理厂应在核材料接收、发运以及库房对核材料设置物项控制区，将核材料作为件料进行控制。物项控制区应满足以下条件：

- (1) 乏燃料组件必须完整、不存在破损，且标识符可清晰辨识；
- (2) 铀、钚产品必须是装在有标识的容器内，容器应加装封记；
- (3) 物项控制区应设置视频设备或其他设备对该区进行24小时不间断监控，并定期对该区进行检查；
- (4) 建立封记应用的管理规程，管理规程应包括封记的储存、控制、使用和处置等内容；
- (5) 对物项的状态进行记录，记录内容应包含物项的物理和化学形态、材料量（包括元素量和同位素量）、封记和物项的标识号等。

## 4. 核材料管理

### 4.1 核材料管理的起点与终点

(1) 后处理厂应将乏燃料组件调入后处理厂时刻作为衡算管理的起点，将最终产品调出后处理厂时刻作为衡算管理的终点。原料、中间产品、滞留料及可以定量测量的固体、液体、气体等排放物或废物中的核材料均需进行衡算管理。

- (2) 属下列情况的核材料，经测量和记录，入帐后不再进行衡算管理。
- a) 按规定手续转移出厂的；
  - b) 作为流出物排放和废物处置的。

### 4.2 核材料调入

乏燃料组件接收应在物项控制区进行，应建立和实施调入管理规程：

- (1) 检查发运文件，按发货单核实物项的标识，检查包装和封记的完整性，核查物项数；
- (2) 由核材料衡算管理组负责对乏燃料组件数据进行登记并填写接收记录和报告，作为技术支持性文件保存，收货文件应有负责人签字；
- (3) 乏燃料组件数据原则上以发方数据为准，收方应进行复核；



(4) 在进行铀、钚MUF评价时,应以收方共去污第一萃取循环(1A萃取柱)萃取液进料料液(1A Feed, 1AF)测量值为准;

(5) 当发现物项标识不清、密封破损等异常现象或出现显著统计性差异或收发差超过双方合同中规定的限值时,应通知发方查明原因。

#### 4.3 核材料调出

铀、钚产品发运应在物项控制区进行,应建立和实施调出管理规程:

- (1) 铀、钚产品发运时,应检查发运物项的数量、标识和封记等;
- (2) 在发货后,核材料衡算管理组应填写发运记录和报告。

#### 4.4 核材料内部转移

后处理厂应建立和实施核材料内部转移管理规程:

- (1) 核材料衡算管理组人员应对内部转移的铀、钚数量等情况进行记录,并在记录上签字;
- (2) 完成转移后,应对平衡区帐目进行更新。

#### 4.5 核材料贮存

后处理厂应建立和实施核材料贮存管理规程:

- (1) 记录所贮存的全部核材料的标识、数量和位置的信息,贮存模式应规范化,以方便实物盘存;
- (2) 贮存原料、中间产品、最终产品和固、液废物等材料的容器和钢桶应考虑便于测量和管理的因素;
- (3) 贮存核材料的容器应加装封记。

#### 4.6 放射性废物管理

- (1) 固体废物,分类包装后,检测记录其核材料数量,进行存放;
- (2) 对工艺生产过程中产生的高放、中放、低放废液进行取样分析,登记其核材料数量;
- (3) 流出物应测量、登记其核材料数量;
- (4) 废物应作为已知损失进行平衡结算。

## 5. 核材料测量

### 5.1 测量范围

后处理厂应对所涉及的原料、中间产品、最终产品和过程中滞留的核物料以及放射性废物和气、液态流出物中的铀、钚进行测量。

### 5.2 核材料测量方案和测量系统

为测量接收、发运、生产过程、库存、放射性废物及气、液态流出物中的核材料量，满足核材料衡算管理的要求，后处理厂必须建立完整可靠的测量方案和测量系统。

建立测量方案和测量系统时应考虑下列内容：

- (1) 测量所用的标准物质和标准源；
- (2) 依据各类被测核材料的类型和特性建立测量方法；
- (3) 核材料衡算对测量方法不确定度的要求；
- (4) 测量仪器的技术要求及维修方法；
- (5) 仪器仪表标准标定方法；
- (6) 测量的质量控制及仪器仪表维护方法；
- (7) 取样和制样方法；
- (8) 数据处理及统计方法；
- (9) 数据和资料的记录要求；
- (10) 误差评价方法；
- (11) 操作人员的资格及培训。

### 5.3 测量方法

(1) 后处理厂主要为散料核设施，核材料测量过程包括取样、总体测量和分析测量。总体测量包括物项的重量或体积测量，分析测量包括物料中元素浓度和同位素成分分析。

(2) 测量方法应满足国家对核材料评估中MUF测量不确定度的要求（见附录一）。

(3) 测量系统应采用规范化的取样方法及标准分析方法，建立严格的记录制度，使测量数据具有良好的可追溯性，并能提供可靠的支持性文件。

(4) 测量分析部门应根据有关标准及规定编制测量方法程序手册。其中应包括：总体测量、取样、化学分析、无损检测方法等的详细内容和要求；测量方法变更记录；标定标准及标定方法说明等。

(5) 后处理厂核材料测量常用分析方法：同位素稀释质谱法、混合式K边界吸收（K-edge, KED）/X射线荧光法（X-ray Fluorescence, XRF）、恒电位库仑法、电位滴定法、激光荧光法、分光光度法、 $\alpha$ 能谱法、X射线衍射荧光法等。

(6) 核材料测量的总体测量、取样和分析测量的各类误差限值应满足但不限于附录二至附录五。

## 6. 测量系统的质量控制

### 6.1 测量系统质量控制的目的

- (1) 保证测量系统持续有效，并符合质量控制要求；
- (2) 要以支持文件证实测量符合规范，并通过检查测量记录和数据来评价实现上述（1）的要求。

### 6.2 测量系统的质量控制目标

为估算测量的随机误差和系统误差提供实验依据；为衡算测量提供符合质量要求的证明文件。

### 6.3 测量系统的质量控制标准

测量系统的质量控制标准以《实施细则》中后处理厂的MUF相对标准偏差限值为准，来选定相应的各种测量、分析方法，使其传递的总误差满足国家MUF相对标准偏差限值要求。

### 6.4 测量系统的质量控制管理

- (1) 必须建立和实施书面的测量质量控制程序，以保证测量系统的有效性。
- (2) 在运行前必须对测量系统的性能进行调试、鉴定和验收。
- (3) 制定测量系统质量控制计划，以保证测量系统正常运行。包括：
  - a) 在操作条件下，定期标定或校验测量系统；
  - b) 建立估算随机误差和系统误差的标准程序；
  - c) 建立测量系统更新和检修后的标定、验收步骤及程序；

d) 建立测量系统质量控制记录、文件系统，记录标准的来源、制备、维护和使用；

e) 建立测量系统标定、数据处理及异常现象的处理等方法。

## 6.5 标样的制备和使用

(1) 收集、制备必需的标样（质量标准及化学、同位素标准）；

(2) 确定原料、产品净重质量的标准件质量，用以确定净重的方差；

(3) 在测量系统的检定周期内，应利用标样对测量系统进行一次全面的校核，用数理统计、方差分析的方法分析评价标准测量数据。分析评价的结果应形成记录文件并编制详细报告存档。

## 6.6 人员要求

(1) 测量人员应具备相应的专业技能，定期进行岗位培训和专业培训；

(2) 对测量人员要定期进行考核。

# 7. 核材料实物盘存

## 7.1 盘存规程

实物盘存是核材料衡算管理的基础，是证实核材料存在的手段。后处理厂应建立实物盘存的规程，严格按照规定的要求进行实物盘存。

## 7.2 盘存时间

(1) 后处理厂应结合生产计划制定盘存时间表，对铀元素，盘存频度每年不得少于一次；对钚元素，盘存频度每年不得少于两次。后处理厂可根据生产工艺的特性，对铀、钚元素同时进行盘存。

(2) 遇到下列情况时必须进行盘存：

a) 转入新的批量生产前；

b) 发生重大事故，影响核材料衡算正常进行；

c) 账面存量 and 实际存量存在显著差异。

## 7.3 盘存的组织及实施

盘存的组织和实施应严格按照规定的要求进行，但应使盘存的组织安排对生产运行的干扰减至最少，并能满意地完成实施计划。

### 7.3.1 职责分工

核材料管制办公室应组织制定书面盘存程序，规定盘存原则及步骤，并组织有关部门贯彻执行。

(1) 盘存负责人必须熟知盘存区，并掌握盘存要求及方法。其主要职责为规划组织和实施实物盘存。为此应授予其停车、开车、中断物流和记录的权利以及在盘存过程中的生产管制权，以保证盘存顺利进行。

(2) 盘存领导小组必须熟知该平衡区的核材料存在的形态及运行状况。按分级盘存规定全面负责盘存事务，并授予其处理有关组织盘存和实施盘存的权限。但是不经盘存负责人批准，不得偏离盘存程序及原则。

(3) 平衡区盘存小组在平衡区盘存负责人领导下，具体负责完成编制盘存清单、贴标签、实施测量和填报数据等工作。为保证实物盘存按盘存规则准确进行，该小组至少由两人组成，其中一人必须熟知本平衡区的情况，另一成员来自其它部门，以监盘员的身份参加实物盘存。未经盘存负责人批准，盘存小组无权偏离盘存规则。

### 7.3.2 物流和记录的截止

盘存时，物流必须与相应的记录在特定时刻同时截止。特定时刻的选择应以确定的衡算周期为依据，使核材料盘存量确实代表了盘存时刻的核材料存在量，而该量要准确地反映在相应的盘存记录上。

#### (1) 核材料收发和废物排放的截止

按盘存规则，在选择特定时刻，一切收、发或废物排放活动都应停止。如特别需要，必须经盘存负责人批准后，才能进行收、发及排放，并且在收货记录上应注明该材料量不计入本次实物盘存，而在发货记录上应注明该材料量列入本次实物盘存之内。废物排放活动原则上应在盘存特定时刻前完成。

#### (2) 记录截止

收、发及排放的记录，在特定截止时刻前完成最后一批收、发记录后应截止，并为核材料衡算周期提供数据。

### 7.3.3 盘存准备工作

(1) 制定盘存日程表，编写盘存细则，准备盘存标签和表格；

(2) 对参加盘存工作的人员，进行针对性的培训，布置具体任务及执行方

法；

(3) 各级盘存负责人会同有关质检管理部门，核实采用的测量装置、标定记录和试验记录，确定测量装置的性能完好性；

(4) 参加盘存的各级负责人应提前检查各自负责的盘存区，以便发现问题时，有足够的时间采取改正和补救措施；

(5) 以件料形式的核材料，应摆放整齐，分区存放，便于清点，并且要检查封记，核对标签与记录；

(6) 以散料形式的核材料，事前应归类分级，并转化为易测量的形态，便于盘存。

#### 7.3.4 实物盘存的实施

严格按盘存规则办事，由盘存小组逐项核对物项、标签，并填写盘存表格。

(1) 实物盘存物项的核材料量必须是测量值。

(2) 实物盘存时应唱报唱记，验证标签，不允许发生漏盘、重盘、漏记、重记。

(3) 经核对盘存记录与实物无误后，编制盘存结果文件。

(4) 解除截止令前，盘存负责人应会同平衡区负责人核查该平衡区内所有物项是否正确贴好标签，并以随机取样的方法核对盘存清单所列数据与标签内容的一致性。如发现差异，应立即采取修正措施。

(5) 核对所有收、发过程与记录的时间是否严格遵守特定的截止时间规定，如发现问题应立即纠正。

#### 7.3.5 盘存后的活动

实物盘存结束后应尽快核算盘存结果及完成帐目调整。配合盘存需要的取样分析工作，要尽力做到及时性。并且对舍入差进行调整，最终进行MUF调整。

## 8. 核材料衡算管理及评价

### 8.1 核材料衡算及评价的条件

(1) 所有进入核材料衡算的数据，必须是实测值，而所用测量系统的误差必须是已知的；

(2) 所有数据具有可追溯性，并具有可靠的技术性文件。

## 8.2 衡算管理

### 8.2.1 核材料衡算

核材料衡算和管理的基点是实物盘存，通过盘存可以证明物料实物的存在。以实物盘存为依据的核材料衡算，通过实物盘存数据，测量方法的误差以及物料衡算环节的数据，计算MUF和 $\delta$ MUF。由此确定是否发生核材料丢失或转移。

### 8.2.2 衡算公式

平衡周期的物料平衡，采用下述衡算公式：

不明损失量（MUF）=期初存量+调入量-期末存量-调出量-已知损失量

公式中（期初存量+调入量-调出量-已知损失量）称为帐面存量，其由测量系统测得；期末存量由实物盘存获得。

## 8.3 衡算评价

后处理厂应在平衡周期末进行核材料平衡结算（计算方法参考附录六）：

（1）设施铀测量系统误差传递总标准偏差应符合附录一的规定，即MUF值的相对标准偏差 $\delta$ MUF $\leq$ 0.8%；

（2）设施钚测量系统误差传递总标准偏差应符合附录一的规定，即MUF值的相对标准偏差 $\delta$ MUF $\leq$ 1.0%；

（3）当MUF值小于或等于2倍的MUF标准偏差 $[2\sigma$ MUF=2 $\times$  $\delta$ MUF $\times$ （期末存量和通过量的大者）]，达到闭合衡算；

（4）当MUF值大于 $2\sigma$ MUF或 $\delta$ MUF大于附录一规定的限值时，后处理厂应重新检查盘存结果、帐目记录以及测量和测量质量控制系统，对可能的未测量的存量（如滞留量、废弃物）进行调查。

## 9. 核材料衡算帐目与报告

后处理厂应按国家规定的频度和时限提交报告，其核材料记录与报告应完整、及时、准确、规范，数据应具有可追溯性。记录系统应及时反映设施中核材料的动态分布。

## 9.1 运行记录（源数据）

（1）运行记录包括：确定核材料数量及组成变化的操作数据记录、容器和仪表的标定数据、取样分析数据、测量质量控制数据、随机误差和系统误差数据、实物盘存数据及事故记录数据；

（2）运行记录格式，应根据具体操作来设计，但日期、操作结果记录及操作责任者签字是必不可少的。

## 9.2 衡算记录（帐目）

后处理厂应以平衡区为基础建立完整的核材料帐目,包括总帐、存量变化日志和存量变化文件，详细记录各类核材料的位置、性质和数量。根据需要,在盘存关键测量点建立各类核材料的辅助帐。

（1）总帐：平衡周期内所有核材料存量变化记录的汇总，它代表核材料帐面存量，平衡区应建立不同类型核材料的各类总帐。

（2）辅助帐：盘存关键测量点存量的汇总。

（3）存量变化日志：建立各类核材料存量变化日志，按照存量变化日期逐行记入每个存量变化文件的变化总量。存量变化日志的月累计量，按月记入平衡区各类总帐。

（4）存量变化文件：根据运行记录逐项记入存量变化的每个物项的识别号 and 材料量，每个存量变化文件的总量应记入各类总帐、辅助帐和存量变化日志。

## 9.3 衡算报告

后处理厂核材料衡算报告至少应包括下列内容：

（1）“核材料交接统计报表”

当核材料进行国内转移时，调出单位应在核材料转移发生时填报“核材料交接统计报表”。调入单位应对调出单位寄送的“核材料交接统计报表”进行确认、盖章，并填报调入单位的核材料测量数据。

（2）“核材料库存变化统计报表”

当核材料发生国内转移、国外转移和其他类型的核材料存量变化时，核材料持有单位应填报“核材料库存变化统计报表”。

（3）“核材料库存统计报表”



在核材料平衡周期末完成核材料实物盘存后，核材料持有单位应填报“核材料库存统计报表”。

(4) “核材料平衡统计报表”

在核材料实物盘存后完成材料平衡结算时，核材料持有单位应填报“核材料平衡统计报表”。

## 附录一 闭合材料平衡 MUF 的相对标准偏差限值

闭合材料平衡 MUF 的相对标准偏差限值

核材料类型	$\delta$ (MUF) (%)
铀	0.8
钚	1.0

## 附录二 核材料总体测量方法误差限值推荐值

核材料总体测量方法误差限值推荐值

测量对象	仪器/方法	随机误差%	系统误差%	国际不确定度目标值%
质量	基于称重传感器的称重系统	0.05	0.05	0.07
	电子天平	0.05	0.05	0.07
体积 <sup>1</sup>	电子压力计 <sup>2</sup> (计量罐)	0.05	0.1	0.11
	电子压力计 <sup>3</sup> (工艺罐, 高浓度)	0.2	0.2	0.28
	电子压力计 <sup>4</sup> (工艺罐, 低浓度)	1	1	1.4
	电子压力计 <sup>5</sup> (计量罐)	0.3	0.2	0.36
密度	电子压力计 <sup>6</sup> (计量罐)	0.05	0.05	0.07
	电子压力计 <sup>6</sup> (工艺罐, 高浓度)	0.1	0.1	0.14
	电子压力计 <sup>6</sup> (工艺罐, 低浓度)	0.7	0.7	1
	振动管密度计	0.05	0.05	0.07

1. 在压力、密度和温度测量的基础上作体积测定。体积测量的不确定度取决于液体的均匀性、密度的测量质量和刻度质量, 以及绝对误差分量。在确定体积测量的总不确定度时应考虑绝对误差分量。
2. 对于新建大通量设施中的计量罐, 在充满体积时, 如果经过精确刻度, 环境和温度条件稳定, 且液体均匀性及稳定性良好, 用高精度电子液体压力计进行测量时, 随机误差和系统误差的不确定度分别可达0.05%和0.1%。
3. 高浓度Pu溶液工艺罐, 装备有高精度电子液体压力计, 且罐的设计尺寸和压力计标定误差很小。
4. 低浓度Pu溶液工艺罐, 装备标准电子压力计, 校准误差较大。
5. 适用于未配备最优电子压力计的老旧设施的体积误差。
6. 上述对于体积计量罐、工艺罐的注解同样适用于密度计量罐和工艺罐, 还应考虑由吹气管管口位差引起的误差分项。

## 附录三 核材料元素浓度取样误差限值推荐值

核材料元素浓度取样误差限值推荐值

材料	随机误差%	系统误差%
后处理输入溶液 (1AF)	0.3	0.2 <sup>1</sup>
高放废液	5	5
硝酸铀溶液	0.1	- <sup>2</sup>
硝酸钚溶液, 硝酸铀、 钚溶液	0.2	-
氧化钚	0.1	-

1. 该数值是指空气提升采样引起的取样不确定度。
2. 误差值尚未定义。

## 附录四 铀元素浓度测量方法误差限值推荐值

铀元素浓度测量方法误差限值推荐值

方法	材料	随机误差%	系统误差%	国际不确定度目标值%
重量分析法	U (纯的化合物)	0.05 <sup>1</sup>	0.05 <sup>1</sup>	0.07 <sup>1</sup>
	U (含Gd)	0.1	0.1	0.14
滴定法 <sup>2</sup>	U (纯的化合物)	0.1	0.1	0.14
	U合金	0.2	0.2	0.28
	U/P混合物	0.1	0.1	0.14
极谱法	U (含Gd)	0.05	0.05	0.07
同位素稀释 质谱	U/P (热室条件)	0.24 <sup>3,4</sup>	0.2 <sup>3,4</sup>	0.28 <sup>3,4</sup>
		0.3 <sup>3,5</sup>	0.3 <sup>3,5</sup>	0.42 <sup>3,5</sup>
	U/P (手套箱条件)	0.15 <sup>3,4</sup>	0.1 <sup>3,4</sup>	0.18 <sup>3,4</sup>
		0.2 <sup>3,5</sup>	0.2 <sup>3,5</sup>	0.28 <sup>3,5</sup>
K边界分析法 <sup>6</sup>	U和U/Pu溶液	0.2	0.2	0.28
混合式 KED/XRF法 <sup>6</sup>	乏燃料溶液	0.2	0.2	0.28
X射线衍射荧光 法 <sup>7</sup>	U溶液 (低浓度)	2	2	2.8
分光光度法 <sup>8</sup>	U溶液 (低浓度)	2	2	2.8

1. 物料含不挥发性杂质小于1000 ppm。
2. 采用硫酸亚铁还原-重铬酸钾氧化电位滴定法。
3. 在核燃料循环中所遇到的全部典型材料。
4. 示踪剂和样品的同位素成分差别大，接近最佳样品和示踪比，示踪剂用量大。
5. 示踪剂和样品的同位素成分差别大，接近最佳样品和示踪比，示踪剂用量小。
6. U浓度大于50 g/L 的溶液样品，测量时间为3×1000s。
7. U浓度为1-50 g/L 的溶液样品。
8. 热室条件下的工艺分析。

## 附录五 钚元素浓度测量方法误差限值推荐值

钚元素浓度测量方法误差限值推荐值

方法	材料	随机误差%	系统误差%	国际不确定度目标值%
重量分析法 <sup>1</sup>	氧化钚	0.05	0.05	0.07
滴定法 <sup>2</sup>	氧化钚和硝酸钚	0.15	0.15	0.21
	氧化U/Pu和硝酸U/Pu	0.2	0.2	0.28
库仑分析法 <sup>3</sup>	Pu（纯的化合物）	0.1	0.1	0.14
同位素稀释质谱	U/Pu（热室条件）	0.24 <sup>4,5</sup>	0.2 <sup>4,5</sup>	0.28 <sup>4,5</sup>
		0.3 <sup>4,6</sup>	0.3 <sup>4,6</sup>	0.42 <sup>4,6</sup>
	U/Pu（手套箱条件）	0.15 <sup>4,5</sup>	0.1 <sup>4,5</sup>	0.18 <sup>4,5</sup>
		0.2 <sup>4,6</sup>	0.2 <sup>4,6</sup>	0.28 <sup>4,6</sup>
K边界分析法 <sup>7</sup>	Pu和U/Pu溶液	0.3	0.3	0.42
混合式KED/XRF法 <sup>8</sup>	乏燃料溶液	0.8	0.5	0.94
X射线衍射荧光法 <sup>9</sup>	Pu溶液（低浓度）	2	2	2.8
α能谱测量	废液（低浓度）	7	7	10
超热中子多重计数器 <sup>10</sup>	U/Pu氧化物	1	1	1.4
量热法 <sup>10,11</sup>	Pu, U/Pu材料	0.4	0.4	0.56

1. 物料含不挥发性杂质小于1000 ppm。
2. 采用如MacDonald和Savage以及Ag<sub>2</sub>O方法。
3. 含有大于25 μgFe/g Pu的样品，需要校正或化学分离。
4. 核燃料循环中所遇到的所有材料。
5. 示踪剂和样品的同位素成分差别大，接近最佳样品和示踪比，示踪剂用量大。
6. 示踪剂和样品的同位素成分差别大，接近最佳样品和示踪比，示踪剂用量小。
7. Pu浓度大于 40 g/L的溶液样品，测量时间为3×1000 秒。
8. U浓度为150-250 g/L，U/Pu比为80-150，测量时间为3×1000 s。
9. Pu浓度为1-50 g/L。
10. 用质谱法测定钚同位素组成。
11. 对于含低燃料的钚材料，可以达到较低不确定度。

## 附录六 后处理厂 MUF 相对标准偏差推荐计算方法

## 后处理厂 MUF 相对标准偏差推荐计算方法

## 1. 若干假设

为了便于 MUF 相对标准偏差, 实践中建立以件、批、层和组元为计量的一套等级系列。

件: 是基础单位, 它具有重量、容积和用破坏性分析或非破坏性分析测量的值。

批: 若干件集合在一起, 且所有集合的件都具有同一的元素浓度, 这就组成了批。批也可能由唯一的一个件组成。

层: 为了减轻统计取样测量, 把具有相似物理化学特性的批组合在一起, 这就是层。

组元: 把层合并形成 MUF 计算方程式的组元。MUF 计算方程式有期初存量、期末存量、调入和调出四大元素组成。

在计算 MUF 相对标准偏差时, 为了方便、统一和规范化, 做以下几点规定:

- (1) 随机误差, 短期系统误差和长期系统误差标准偏差为已知, 且为相对偏差值;
- (2) 在一个批内, 取样数和每个样品的平行分析次数应为常数;
- (3) 在一个层内, 每个批的件数应为常数;
- (4) 在一个层内, 所采用的磅秤和分析方法不超过一台, 一种 (即误差特性要等同);
- (5) 求得的元素浓度只能用于本层。

## 2. 计算中采用的标识符

$X_{kqpt}$ ——k 层中元素总重量, 其重量是用总体测量方法 q 测出, 从 p 类物质中取样用 t 方法分析。若用 NDA 分析, 则总体及取样方法可以省略。有时有可能在一个层内, 不是所有的件都受同一系统误差影响, 即有短期系统误差的问题。这时, 可用括号指出元素总重量是指在“条件 i”下测量的。如:

$X_{kqpt(3)}$ ——k 层在条件 3 下分析方法 t 得出的总重量值。

$X_{kq(2)pt}$ ——k 层在条件 2 下总体测量方法 q 得出的总体重量值。

$\delta$ ——相对标准偏差。其下标如下:

s, g, r—— $\delta$  的第一个下标: s 指长期系统误差; g 指短期系统误差; r 指随机误差。

q, p, t—— $\delta$  的第二个、第三个和第四个下标, 其定义与 X 的下标含义相同, 如仅讨论总体测量时, p 和 t 用“.”代替。如  $\delta_{rq..}$  表示总体测量时的随机误差。

$n_k$ ——k 层中每批的件数。

$m_k$ ——k 层中的批数。

$r_k$ ——为了确定批元素的浓度, k 层中每批的取样数。

$C_k$ ——k 层中每个样品的平行分析次数。

k——总层数。

$V(\dots)$ ——括号内量的方差。如:  $V(\dots)$  表示括号内量的方差;  $V(MUF)$  表示 MUF 的方差。

V 的下标 s, g, r 的含义与  $\delta$  的相同。若无下标, 则表示总方差。

## 3. MUF 随机误差方差的计算

$$V_r(X_{kqpt}) = (X_{kqpt})^2 [(\delta_{rq..})^2/n_k m_k + (\delta_{r.p.})^2/r_k m_k + (\delta_{r..t})^2/c_k r_k m_k] \quad (1)$$

$$V_r(MUF) = \sum_{k=1}^k V_r(X_{kqpt}) \quad (2)$$

## 4. MUF 短期系统误差方差的计算

首先计算受短期误差方差影响的各核材料组元的总体测量值：

$$M_{q(i)..} = \sum_{k=1}^k A_k X_{kq(i)pt} \quad (3)$$

此处：对调入层和期初存量层  $A_k = +1$ ；对调出层和期末存量层  $A_k = -1$ 。

受取样短期系统误差方差影响的总量为：

$$M_{.p(i).} = \sum_{k=1}^k A_k X_{kqp(i)t} \quad (4)$$

受分析短期系统误差方差影响的核材料总量为：

$$M_{..t(i)} = \sum_{k=1}^k A_k X_{kqpt(i)} \quad (5)$$

MUF 的短期误差方差为：

$$\begin{aligned} V_g(MUF) = & \sum_q (\delta_{gq..})^2 \sum_i (M_{q(i)..})^2 + \sum_p (\delta_{g.p.})^2 \sum_i (M_{.p(i).})^2 \\ & + \sum_t (\delta_{g..t})^2 \sum_i (M_{..t(i)})^2 \end{aligned} \quad (6)$$

## 5. MUF 长期系统误差方差的计算

长期系统误差方差计算模型与短期系统误差相类似。即：

首先计算受长期误差方差影响的各核材料组元的总体测量值：

$$M_{q..} = \sum_{k=1}^k A_k X_{kqpt} \quad (7)$$

此处：对调入层和期初存量层  $A_k = +1$ ；对调出层和期末存量层  $A_k = -1$ 。

受取样长期系统误差方差影响的总量为：

$$M_{.p.} = \sum_{k=1}^k A_k X_{kqpt} \quad (8)$$

受分析长期系统误差方差影响的核材料总量为：

$$M_{..t} = \sum_{k=1}^k A_k X_{kqpt} \quad (9)$$

MUF 的长期误差方差为：

$$V_s(MUF) = \sum_q M_{q..}^2 \delta_{sq..}^2 + \sum_p M_{.p.}^2 \delta_{s.p.}^2 + \sum_t M_{..t}^2 \delta_{s..t}^2 \quad (10)$$



## 6. MUF 相对标准偏差计算

$$\delta(MUF) = \sqrt{V_r(MUF) + V_g(MUF) + V_s(MUF)} \quad (11)$$

## 7. 误差以绝对值形式表达时的方差计算

在衡算实践中，尤其是总量称量，常常遇到误差是用绝对值形式表达，在这样条件下，以上讨论的误差传递公式必须要作些改变，以方便计算。

令 $\sigma$ 为表达标准偏差的绝对值，则：

$$\delta_{rq..} = \frac{n_k m_k \sigma_{kq..}}{X_{kqpt}} \quad (12)$$

在（1）公式中的第一项可用 $n_k m_k (\sigma_{kq..})^2$ 代替，这样以称重的次数代替了重量。

在（3）公式和（7）公式中当误差以绝对值表达时， $X_{kq(i)pt}$ 及 $X_{kqpt}$ 相应乘以 $\frac{n_k m_k}{X_{kq(i)pt}}$ 和

$\frac{n_k m_k}{X_{kqpt}}$ 以后，计算时就可直接使用 $\sigma_{kq..}$ 绝对误差。