

附件二：

医用同位素生产堆（MIPR）设计准则（征求意见稿） 编制说明

一、编制《医用同位素生产堆（MIPR）设计准则》的必要性

溶液堆是利用含有一定富集度 ^{235}U 的盐的水溶液作燃料的均匀性反应堆。利用在溶液堆堆芯中的核燃料裂变产生的裂变产物，分离出医学上可应用同位素的溶液堆称为医用同位素生产堆（Medical Isotope Production Reactor, MIPR）。本准则中医用同位素生产堆专指以 $^{235}\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ 溶液作燃料，热功率为 200kW 级的“水锅炉”型医用同位素生产堆。

水溶液均匀堆上世纪 50~60 年代在世界上建成 40 多座，主要用于活化分析、中子物理以及教育与培训等。现大部分已退役，后来由于非均匀堆的发展，取代了水溶液堆。现在运行的水溶液均匀堆有法国的 SILENE 堆和俄罗斯的“Argus”堆等少数几座。

国内外对钼-99、碘-131 的需求量日益增加，目前以核反应堆辐照靶件法生产，此法生产投资大，产生的放射性废物多，对环境影响大，成本高。

1993 年提出了用水溶液堆生产医用同位素。开辟了专用医用同位素生产堆——水锅炉型溶液堆。水溶液堆的特点是：燃料制备简单、铀、钚及裂变产物去除简单、节省中子等。该堆负温度系数大，固有安全性好；无需燃料元件加工和后处理；无需靶件加工、辐照和化学溶解处理；同位素生产成本低，铀-235 消耗量少。因此各国都在关注医用同位素生产堆的开发。

我国在医用同位素生产堆开发上起步较早，进行了大量的非核试验。现设计 MIPR 试验堆或 MIPR 原型堆条件已基本成熟，但我国从未设计建造过水溶液堆，而且 MIPR 堆功率较高，更缺乏设计建造经验。我国又缺乏该方面的设计标准与准则。因此应编写一套《医用同位素生产堆（MIPR）设计准则》是必要的，经专家审查，国家核安全局批准，以技术文件形式发布，以指导医用同位素生产堆（MIPR）设计并为安全审查提供参考。

二、编制依据

为了编制《医用同位素生产堆（MIPR）设计准则》，编制者认真查阅了水锅炉型溶液堆的有关资料、与国外专家交流，进行必要的验证试验验证（如 1:1 热工水力性能试验、材料腐蚀验证试验、堆芯流致振动试验、燃料转化与配制验证试验、燃料转化中除氟工艺验证试验、燃料纯化工工艺验证试验、气回路设计验证试验、放射性核素提取验证试验以及零功率物理试验），找出溶液堆的特点，结合研究堆有关法规、导则来进行编写。对研究堆有关法规、导则不够完善部分参照核电厂相关法规、导则编写。

三、 编制过程

2003 年中国核动力研究设计院提出了设计准则目录清单及编写要求，组织有关人员进行编写，部分准则写出初稿。后又组织人员深入调研国外有关溶液堆的资料、与国外同行专家进行交流、进行大量验证性试验以及进行设计深化。在此基础上对“准则”进行补充与修改，2006 年 4 月委托苏州热工所以技术审查的形式协助开发完善医用同位素生产堆（MIPR）设计准则，经过 Q1、A1；Q2、A2 书面问答以及多次讨论，形成本“系列准则”。

四. 主要内容和需要说明或讨论确定的问题

1. 主要内容

本“系列准则”共 18 个，具体准则名称如下：

医用同位素生产堆（MIPR）安全设计准则

医用同位素生产堆（MIPR）运行及事故工况分类准则

医用同位素生产堆（MIPR）系统、部件和构筑物的安全功能和分级准则

医用同位素生产堆（MIPR）事故分析准则

医用同位素生产堆（MIPR）燃料溶液设计准则

医用同位素生产堆（MIPR）核设计准则

医用同位素生产堆（MIPR）热工水力设计准则

医用同位素生产堆（MIPR）反应堆容器及堆内构件结构设计准则

医用同位素生产堆（MIPR）反应堆水池设计准则

医用同位素生产堆（MIPR）料液输送和放射性同位素提取系统设计准则

医用同位素生产堆（MIPR）放射性生产线设计准则

医用同位素生产堆（MIPR）气回路系统设计准则

医用同位素生产堆（MIPR）堆顶小室及堆厂房功能设计准则

医用同位素生产堆（MIPR）辐射监测系统设计准则

医用同位素生产堆（MIPR）通风与空气净化系统设计准则

医用同位素生产堆（MIPR）燃料贮存设施设计准则

医用同位素生产堆（MIPR）燃料溶液配制设计准则

医用同位素生产堆（MIPR）燃料溶液纯化处理系统设计准则

这 18 份准则与研究堆设计准则有较大的差异，其余部份参照研究堆设计准则执行。

2. 需要说明或讨论确定的问题

1) 医用同位素生产堆（MIPR）是水锅炉型溶液堆，热功率为 200kW 级，反应堆间断运行，每次运行 24~48 小时，停堆 1 小时燃料溶液充分冷却后，再进行同位素提取。MIPR 采用 $UO_2(NO_3)_2$ 水溶液作燃料溶液，为了减少超铀元素（特

别是铀)的产生量,有利于确保主要医用同位素产品(如⁹⁹Mo、¹³¹I等)的质量,采用高富集度(如²³⁵U的富集度为90%)浓缩铀。

2) 商业用医用同位素生产堆,可采用一炉料双堆位运行,以防止双堆料的叠加造成超临界事故。

3) 医用同位素生产堆具有高度的固有安全性:

a. 满足溶液加水或失水引入负反应性。现实起见,运行工作点溶液浓度可向过慢化方向偏离,这样失水初期可引入一定的正反应性,但其正反应性在控制棒拒动下可由堆芯温度升高至饱和温度前引入的负反应性予以抵消;

b. 全厂断电控制棒拒动,靠堆芯温度升高使堆功率下降,堆功率降至堆芯自然散热平衡功率,此时堆芯不沸腾;

c. 不存在弹棒事故,因为没有弹棒机理。只考虑提棒事故,提棒事故分为两种,一种为热态满功率误提棒,另一种为冷态零功率误提棒。只要限制提棒速率完全可以做到在瞬态过程堆芯温度不超过沸腾值。

4) 溶液堆堆芯和以燃料元件组成堆芯有不同,包容结构(包括堆芯容器在内的一次边界)相当于后者的燃料元件包壳。因此还要有包容气回路的堆顶密封小室以及包容堆容器的水池构成二次包容。密封厂房及水池结构外面空间构成三次包容。从安全角度上考虑,对包容结构(包括堆芯容器在内的一次边界)以及包容一次边界的构筑物还应按 HAFJ0002《含有有限量放射性物质核设施的抗震设计》中 B 级核设施要求进行设计,确保包容结构在地震工况下能保持正常防漏密封,土建结构不倒塌。

5) 采用两套停堆系统。第二套停堆系统采用排燃料溶液停堆。排燃料溶液停堆是比较方便实现的。

6) 采用维持气回路气压自动排氮气是可行的。

7) 采用氢氧复合水自动回堆系统,将补水箱中加酸改为补酸箱,控制补酸箱酸的初始浓度,保证堆芯溶液酸度变化在允许范围内。该方案是可行的。

8) 燃料溶液输送及放射性同位素提取系统是 MIPR 医用同位素生产线的重要系统,。该系统中燃料溶液输送部分主要用于将燃料溶液暂存罐内的燃料溶液输送入反应堆容器,并可将反应堆容器内的燃料溶液经同位素提取柱后进入燃料溶液暂存罐。放射性同位素提取部分用于放射性同位素的提取以及对放射性同位素提取柱和纯化柱进行淋洗和转型。

9) 随着 MIPR 运行时间延长, MIPR 燃料溶液中的裂变产物积累增多,其中中长寿命放射性核素(如¹³⁷Cs、⁹⁰Sr、⁹⁵Zr、¹⁰⁶Ru、¹⁴⁰Ba、¹⁴¹Ce、¹⁴⁴Ce、¹⁵⁶Eu等)增多,将增加燃料溶液辐射剂量。放射性杂质增多,将影响所提取的医用同位素产品质量。另外裂变产物中还积累了部分中子毒物(如 Sm、Eu、Gd等),将降

低反应堆堆芯的 K_{eff} ，因此应定期采用无机离子交换纯化流程，对 MIPR 燃料溶液纯化、除去多余的裂变产物。

10) MIPR 通过布置在核燃料水溶液中的传热（盘）管带走热量，传热管与溶液的换热形式属于有限空间的自然对流换热，相对比较复杂，受通道的几何形状影响较大，迄今尚无一个像强制对流那样能够适用于各种几何形状的普遍关系式；而且在反应堆运行期间，燃料溶液中会产生大量气体，包括氢气、氧气、氮气、水蒸汽和裂变气体等，这些气体对堆内的传热会产生较大的影响，使溶液和冷却水间传热变得较为复杂。

11) 同位素生产堆（MIPR）采用 $UO_2(NO_3)_2$ 水溶液作燃料，铀裂变在溶液中进行，同时产生 H_2 、 O_2 、 N_2 等气体。为了确保反应堆运行安全，避免放射性气体外泄，必须设置气回路系统将堆芯产生的氢气载出进行催化复合，并且以低于环境压力下运行，达到“无放射性后果”水平。