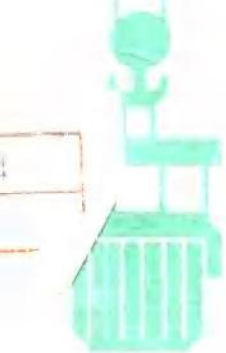


辐照核燃料运输容器 设计指南

原子能出版社



内 容 简 介

本指南是美国橡树岭国立实验室为美国原子能委员会反应堆发展与工艺部编写的,其目的是为设计人员提供关于辐照核燃料运输容器设计、试验、检查和维修的实用工程标准,以使他们设计的容器符合美国有关规范的要求。

本指南内容包括:结构设计、传热设计、临界设计、屏蔽设计、材料以及制造工艺。主要讨论内外钢包的铅屏蔽容器,最后一章简单地谈到铀屏蔽容器。文中广泛收集了现有资料,其中有些取自尚未完成的试验计划。

本指南可供辐照核燃料运输容器设计、检查、操作和维修人员参考,也可供有关专业的师生参考。

CASK DESIGNERS GUIDE

A Guide for the Design, Fabrication, and Operation of Shipping Casks for Nuclear Applications

L. B. Shappert
(ORNL-NSIC-68)

1 9 7 0

* * *

辐照核燃料运输容器设计指南

原子能出版社出版

地质印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

(只限国内发行)

☆

开本 850×1168 1/32·印张 7·字数 185 千字

1975 年 11 月北京第一版·1975 年 11 月第一次印刷

印数 001—1800·定价: 1.00 元

统一书号: 15175·022

原 序

本报告经美国原子能委员会反应堆发展与工艺部同意出版,其目的是包括容器设计人员所需要的全部情报资料,以保证所设计的容器符合美国运输部和原子能委员会的联邦规范的性能规格要求(见第一章)。因此,无论是容器设计人员或检验人员,都会发现这份资料对他们的工作非常有用。

虽然对容器设计各方面不可能保证绝对安全,但作者力争做到与联邦规范的要求和意图严格一致。在编辑过程中,作者不仅大量地使用了现有的有关资料,而且根据这些资料制定了提供补充技术资料的研究与发展计划。该计划(包括在橡树岭和其他地方进行的研究)研究的范围为:屏蔽、结构材料、设备制造、临界以及在正常与事故条件下的热传导。

本文列出的一些数据取自尚未完成的试验计划;在这种情况下,这份资料只能是初步的。然而,由于文献的进一步校正工作尚未确定,我们认为最好在给出初步结果的同时,也给读者提供一些有关计划的资料。

本书的草稿《辐照核燃料运输容器设计指南》(ORNL-TM-2410),于1969年1月出版,并送发五百多位放射性物质包装与运输等各方面的有关人员。根据读者的批评建议,这次出版做了许多修改。

目 录

1. 引言	1
1.1 范围	5
1.2 容器专用术语	5
1.3 质量保证	6
1.4 报告	6
1.5 容器批准	6
1.5.1 一般情况	6
1.5.2 包装种类	7
1.5.3 免除标准包装、符号和标签、免除量的包装要求	7
1.5.4 同位素包装范围	16
1.5.5 裂变物质	16
1.6 参考文献	18
2. 结构设计	19
2.1 内壳厚度	19
2.2 外壳厚度	19
2.2.1 方程(2.1)的根据	22
2.3 焊接设计	24
2.4 容器的封头, 垫圈和螺栓设计	28
2.4.1 垫圈的选择与设计	28
2.4.2 固定容器盖的螺栓或双头螺栓的设计	33
2.4.3 容器封头的设计	36
2.5 起吊装置	40
2.6 栓系装置	44
2.6.1 一般的考虑	44
2.6.2 栓系方法	47
2.6.3 分析方法	50
2.7 30 呎冲击对铅屏蔽的影响	50

2.7.1	冲击情况下的材料性能	51
2.7.2	无肋圆柱形容器横向冲击分析	52
2.7.3	端部无缓冲器圆柱形容器的轴向冲击分析	56
2.8	减震结构	58
2.8.1	肋片	58
2.8.2	空心环型能量吸收器	59
2.8.3	保护性缓冲器	61
2.8.4	铝制蜂窝的特性	64
2.8.5	美国陆军-原子能委员会车辆冲击研究	67
2.9	试验要求	68
2.9.1	假定的事故条件	68
2.9.2	正常运行条件	69
2.10	关于容器屏蔽材料的评论	71
2.10.1	在正常条件下的传热	74
2.10.2	在事故条件下的传热	75
2.11	燃料篮设计	76
2.11.1	在运输和处理时燃料的保护和密封	76
2.11.2	热量的消散	77
2.11.3	临界控制	77
2.12	简单梁的要求	79
2.13	参考文献	81
3.	材料	84
3.1	板材	85
3.2	管材	86
3.3	锻件、配件和螺栓	86
3.4	焊接电极、焊条和焊丝	86
3.5	特殊材料	87
3.6	识别标记和购买订货要求	87
4.	制造	88
4.1	材料	89
4.1.1	工厂试验报告和标记	89

4.1.2	材料切割	89
4.1.3	材料缺陷的修复	90
4.1.4	材料的成型	90
4.2	材料的鉴定和检查	90
4.3	焊接	91
4.3.1	焊接工艺和填充金属	91
4.3.2	焊接工序审查	91
4.3.3	焊工考核	92
4.3.4	焊接允许的最低温度	92
4.3.5	装配和对准	92
4.3.6	焊接面在焊前的清洗	93
4.3.7	焊接接头对准公差	93
4.3.8	完工接头	93
4.3.9	各种焊接要求	93
4.3.10	焊缝缺陷修复	94
4.4.	碳钢的焊接金属覆面	94
4.4.1	焊接工序审核要求	94
4.4.2	进行考核测验	96
4.5	完全覆层或焊接金属作为覆层材料的连接	96
4.6	焊后热处理	96
4.7	铅浇注	96
4.8	检验	97
4.8.1	检查员的活动范围	97
4.8.2	材料检验	97
4.8.3	制造过程中的表面检查	97
4.8.4	尺寸检查	98
4.8.5	焊接检查	98
4.8.6	焊后热处理过程的检查	98
4.8.7	制造过程中的检查	99
4.9.	试验	99
4.9.1	屏蔽箱泄漏试验	99
4.9.2	压力试验	99

4.9.3	泄漏试验	99
4.9.4	热传导验收试验	100
4.9.5	屏蔽性能试验	100
4.10	制造档案	101
5.	传热	103
5.1	引言	103
5.2	热源	104
5.2.1	衰变热负荷	106
5.2.2	太阳热负荷	108
5.3	外部传热	111
5.3.1	从容器表面的热迁移	112
5.4	内部传热	120
5.4.1	燃料棒温度计算	123
5.4.2	燃料棒的破损温度	123
5.5	火灾分析	131
5.5.1	图解法	132
5.5.2	模拟法	136
5.5.3	能量平衡法	136
5.5.4	数字计算机在研究火灾引起的热瞬态中的应用	150
5.6	参考文献	152
6.	临界	155
6.1	引言	155
6.2	防止临界的方法	155
6.2.1	应用	156
6.3	正常运输条件	158
6.3.1	新燃料的假定	159
6.3.2	燃耗对反应性的影响	159
6.4	运输中的最大可信反应性的条件	161
6.5	临界证明	162
6.5.1	安全限值	162
6.5.2	计算证明	163

6.5.3 实验证明	166
6.6 参考文献	167
6.7 临界实验参考资料目录	170
7. 屏蔽	180
7.1 一般考虑	180
7.2 美国运输部的几点规定	180
7.3 屏蔽估计	181
7.3.1 列线图与计算机程序的比较	182
7.4 开启车辆外部剂量率的计算	183
7.5 用钢作外包壳对容器外部剂量率的影响	184
7.6 密闭车辆的外部剂量率的计算	188
7.7 举例	188
7.8 参考文献	189
8. 铀屏蔽容器	190
8.1 一般考虑	190
8.2 铀的性质	191
8.3 工艺因素	191
8.3.1 热膨胀	191
8.3.2 热循环长大	192
8.3.3 在燃烧时铀-铁合金的生成	192
8.3.4 化学反应性	192
8.3.5 铀合金	193
8.4 设计考虑	193
8.5 制造	194
8.5.1 铀的焊接	195
8.6 原型铀屏蔽容器的试验	195
8.7 铀屏蔽容器实例	197
8.8 参考文献	199
附: 屏蔽运输容器最大损伤的预计	200

1. 引言

动力反应堆废燃料元件在国内的运输应符合运输部(DOT)和美国原子能委员会制定的规范。运输部危险物质规范局最近修订了这些规范,使它们更全面并取消了许多细目^[1]。规范的主要目的当然是用严格限制人所接受的放射性辐照量和污染量的办法来保护公共安全。

本指南各部分所参考的规范主要是美国原子能委员会的规范(参考 AECM0529,而 AECM0529 和以 CFR 标题 10 第 71 节所发表的相同),偶尔也提到运输部的规范;这些规范都近似,而且一般说来都是合适的。

规范是按照性能标准条件编写的。容器设计人员自由地发挥他自己的见解,首先是如何满足这些要求,其次是如何验证他的设计符合要求。由于各种容器的设计人员对规范有着他们自己的解释(可能是错误的)会引起一些麻烦,可以研究一些结构评价的新方法。过去没有发表过对试验进行综合分析处理或者提供经受了时间考验的分析方法的文献。

1966 年反应堆发展与技术部 (ROT) 请求橡树岭国立实验室 (ORNL) 编写一份用于辐照燃料运输容器设计、制造、试验、检查和维修的实用工程标准指南。最初,确定指南资料必须适合于有钢内壳和钢外壳的铅屏蔽废燃料容器,由于这种容器目前在美国使用得极为广泛;随后再推广到包括其他适当的屏蔽材料。指南必须有这样的性质,即只要符合指南的要求就初步满足了联邦规范的性能标准。此外,指南要提供详细的工程数据以证实它的规定,如果需要,要通过解释,推论和判断来阐明指南规定的安全程度和保守程度。这就能提供一个轮廓来判断不同的方法、工艺和材料以保证其保守程度是一致的,并进而提供有助于发展技术和

结合实践方面的一些方法。本指南概括了橡树岭国立实验室在完成这一委托任务时所做的工作。

该报告的初稿曾交有关人员广泛传阅；征求了读者的意见和建议，然后由 ORNL 进行了修改。这些意见成为本文献中许多更改的根据。

指南中提出的分析方法是想提供关于容器设计方面的合理准确的资料。有的地方分析的准确性还不清楚，就选用一个安全系数来考虑这些不定因素。如果能够证明所用的方法使生产出的容器的安全性与本指南中的方法相等或有所提高，也可以不用本指南中的分析方法。

指南有八章。第一章是绪言摘要。第二章是关于运输容器的结构设计。第三章和第四章分别讨论与设计紧密相关的结构材料和制造方法。第五章是有关传热问题。第六章叙述了能够证明一个系统符合现行联邦规范临界要求。第七章介绍屏蔽方面的资料。而第八章是关于用铀作结构和屏蔽材料的资料。

规范早期文本指出，为了计算，可认为从 30 呎自由降落所造成的冲击等于用 60 *g* 减速力对容器作用 0.016 秒，虽然规范以后的文本中删掉了这一点，但偶尔还用来说明 30 呎降落要求的规定。我们的研究指出，使用这种力不会产生象 30 呎降落产生的损伤。如第二章所述，根据能量守恒原则，用分析的方法可以更好的估计损伤。

目前尚无充分的资料可用来有把握地预计哪种铅屏蔽容器的焊接接头是最好的。根据静态和动态试验的观察以及与容器冲击试验直接观察者接触的个人所提出的有限的资料，ORNL 认为某些接头设计承受 30 呎自由降落试验会比其他设计结果更好。因此，第二章所推荐的接头设计是从现有的这些资料看比较有效的工程实施为基础的。

虽然第二章讨论了关于失去屏蔽的问题，由 30 呎自由降落产生的主要危险仍是容器包壳破裂；因此必须保证外罩（包括阀、压力释放管等）不受冲击。为此，在 2.8 节中叙述了为此目的而采用

了能量吸收器。

容器分析最重要的要求之一是指容器在经受冲击之后其密封仍是完整的。通常是用盖外罩上的力来保持密封，外罩用螺栓和双端螺栓固紧；问题多半出在这些螺栓和双端螺栓吸收能量的能力上。当对一给定螺栓或双端螺栓能力进行精密计算缺乏足够有效数据时，2.4 节给出的方程式能为外罩提供稳妥的螺栓型式设计。

由于容器设计的主要目的是屏蔽和容纳放射性物质，因此结构材料(在第三章中讨论)必须能在规范规定的各种环境条件下都具有良好的性能。从材料使用的观点来看，钢在环境温度下有着良好的强度，延性和韧性。我们假定，那些如规范所述，在 -40°F 使其却贝氏键孔试样(Charpy keyhole specimen)断裂所需最低能量为 15 呎·磅的材料，在普通运行条件下将是适用的。这样的韧性足以防止低温脆裂。

与要求容器钢壳具有高度的可靠性相反，对用在支架、起吊、栓系和类似非密封结构方面的钢的要求是不严的。这些构件损坏引起的影响很微小，因为一般说来一种材料单独损坏不足以引起容器丧失密封和屏蔽。

设计者可以随意选定除这些推荐之外的其他材料；但是第三章所述的因素在容器设计时必须考虑。为了帮助设计者，本章还提供了适用作运输容器的放射性屏蔽和临界控制材料的一览表。

现有的规范和标准中没有特别提及运输容器的制造和检查要求。第四章指出最低限度的质量保证要求，这些要求条件和 AEC 推荐的以 RDT 标准 F₂-2 所述的条件相同。为了保证要求条件，检查员，作为容器买主的代理人要检查制造厂家的进货、制造、检查和试验记录来确定是否遵守交货的标准。这样一个系统是有价值的，因为它能对容器买主和美国原子能委员会保证绝对安全和最终产品的质量。

在第五章计算正常条件下废燃料和容器的最高温度时，考虑了太阳和衰变热源。虽然这两项热负荷是作为时间的函数在变化，

但是容器设计时一般是将这两项热源考虑在规定的热负荷中。由于太阳热负荷对大型容器表面温度影响大于对容器内腔温度的影响，因此表面温度限制(按 DOT 和 IAEA 规定一般为 180°F) 必须严格地检查。内部温度常常能用平均太阳热负荷计算(参看 5.3.1 的例子)。

容器在规范规定的假定火灾的情况下的响应特性难以作精确的估计。例如，几乎没有一次容器火灾试验是正确的安装了仪器而可用来进行理论和经验比较。到目前为止已累积的资料指出，为了得到有效的结果，只能进行原型容器试验而不应进行比例模型试验。近来，发现容器在 1475°F 下的炉子试验由于不能控制源的外逸使之达到规定值的 0.9 可能不等于规范所要求的火灾试验。此外，实际试验时容器和热源之间必然存在着规范没提到的对流和辐射。这种情况就使理论难以和实际经验联系起来。

联邦规范要求每次裂变物质运输，包括装卸在内的整个运输期间，以及引起最大可信反应性布置的假定事故条件下，都要保持次临界状态。指南的第六章讨论保证次临界要求的证据，而不是维持次临界的方法。为经济和实用起见，将允许货主采用任何实际管理方法使系统处于次临界状态；但是他必须提出证据证明这些管理是合适的。文中讨论了哪些类型的证据是可以接受的。

验证次临界最好是采用以下方式，即把需要运输的燃料按最大可信的反应性布置排列起来。在进行这种燃料的反应堆临界实验的同时，希望能有容器概念设计，因为要预计与运输有关的次临界程度，只需要做几次附加实验就够了。当以上做法不可能时，次临界的证据必须由计算方法提供。这些方法的精确性可以用分析一些使用了同样燃料的特定临界实验来证实。为此，指南提供了各种实验的注解表。

第七章是以图解形式给容器检查员提供一个迅速而合理准确的方法来断定给出容器的铅屏蔽厚度是否适合于某一具体用途。

由于规范规定了距离容器表面为 3 呎处的剂量率和表面剂量率，文中以容器尺寸的函数给出了有关表面剂量率到距离表面 3

呎处达 10 毫伦琴/小时剂量率的一个列线图。

1.1 范 围

由于具有钢壳和铅屏蔽的容器使用得最普遍，所以指南主要是广泛地涉及到这种类型的容器。而在第 8 章讨论了铀的结构和屏蔽性质。

1.2 容器专用术语

图 1.1 是一个示出了主要构件的废燃料容器剖面图。本指南

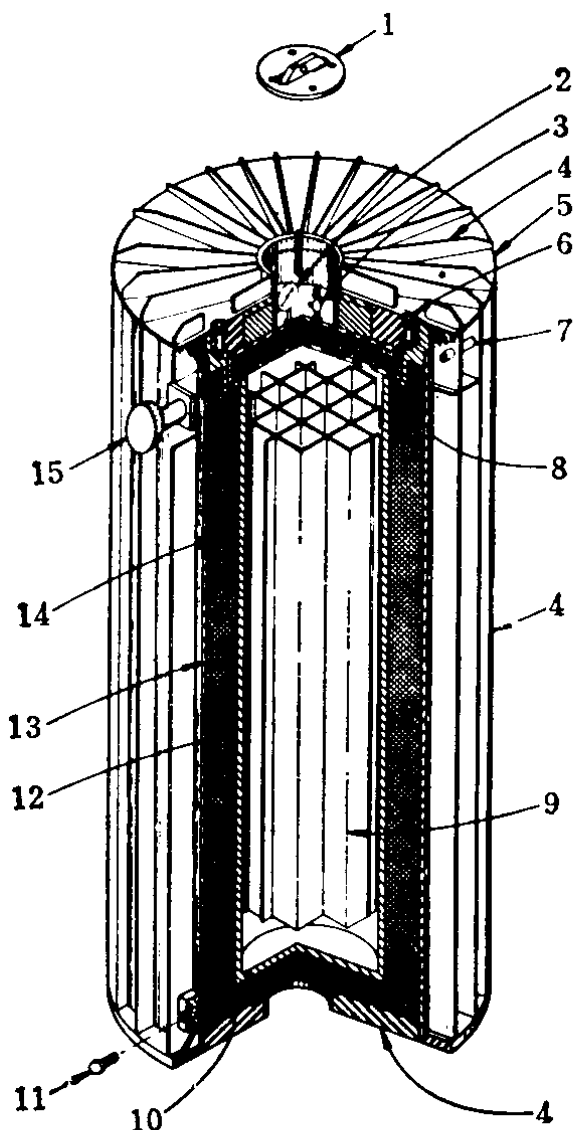


图 1.1 运输容器剖面图

1—提升耳和盖；2—压力计；3—安全阀；4—肋片；5—盖；6—压盖埋头螺栓和螺母；7—栓系耳；8—O 环垫；9—燃料篮；10—排水口；11—排水口堵头；12—内壳；13—外壳；14—屏蔽；15—提升耳轴

自始至终引用了这些构件的名称。

1.3 质量保证

制造者需要一个质量控制计划，这个质量控制计划要保证完工的容器完全反映买主的要求。本指南所讨论的要求对大多数运输容器来讲认为是最低限度的质量控制保证。为保证更高的性能要求，设计者必须很好地运用判断力并且采取更为严密的措施。

容器制造者要有它自己的检查试验人员和设备，在整个容器制造过程中保证材料、构件和制造质量。

购买人的检查员必须核实制造质量控制确被保持并且检查各个零件和加工过程都符合批准的图纸和技术要求。当检查员感到质量不能得到保证时，他必须有权利在任何时候停止关于容器的工作。

制造者要把材料试验报告、热处理图和其他可证明整个加工过程的文件放入“制造记录”（4.10 部分）中并和容器一起提交买主。买主或他的代理人在这些文件放入记录以前要求知道并承认这些文件。这些文件能保证买主全面地了解构造的各个方面。这种承认不能解释为可减轻容器制造者按合同规定保证产品符合设计要求的责任。

1.4 报 告

设计人员要给买主提供一份容器设计报告书，该报告书中要列入所有的设计假定、容器限制和维修要求。此外，还要提供一个容器操作手册，该手册要说明全部已知的使用限制。

1.5 容器批准^[5]

1.5.1 一般情况

货主首先查阅规范决定是否有已由运输部批准用于运输他的放射性物质的包装容器。这种包装容器定为“标准容器”。

如果没有标准容器适合他的需要，则货主必须请求运输部和

原子能委员会特殊批准用现有的已批准的容器运输他的放射性物质。如果不能用,则必须设计新容器。

如果必须设计新容器,则请求批准的规定条文在现在和将来可能使用的条件方面要尽可能广泛。

有时,在包装使用以后发现分析方法保守了;因此,如果根据经验需要扩大使用范围的话,可以修改原来的许可证。

如果包装将用于国外运输,要考虑国际原子能机构(IAEA)^[4]的要求,并在请求本国批准的同时请求主管当局(美国运输部)按国际规范批准运输。

1.5.2 包装种类

和国际放射性物质运输规范所依据的原则相同,美国运输部将放射性物质分成 I—VII 组(参看表 1.1)。根据有关的同位素辐射毒性,将运输包装分成 A 和 B 型。少量比较毒的物质和大量毒性小的物质可以用同类型的包装运输。A 型包装限于少量的放射性物质,一旦包装毁坏造成外泄时,不会造成大规模的危害。B 型包装是用来运输较大量的放射性物质,被设计成能在假定运输事故条件下防止放射性物质外泄。如果放射性物质的量大于 B 型包装所规定的量,则必须用由美国原子能委员会和运输部特别批准的包装来运输。

表 1.2 用来确定没列入表 1.1 的放射性物质的组号。

1.5.3 免除标准包装、符号和标签、免除量的包装要求

1. 放射性量不超过表 1.3 范围的放射性物质可免除标准包装、符号和标签。

2. 在一般运输事故条件下包装必须不泄漏。

3. 包装容器必须标有“放射性”字样。

4. 航空货运单必须记上“免除包装的放射性物质”。一般货运单上也必须有“不需要标签”的文字记载。

5. 包装的表面放射性剂量必须不超过 0.5 毫伦/小时。

空包装箱

1. 以前装过放射性物质的空箱在运输前内部必须仔细清洗,

表 1.1 放射性核素运输分组

元 素*	放 射 性 核 素***	组 别	比 放 射 性 (居里/克)
锕(89)	Ac ²²⁷	I	7.2×10
	Ac ²²⁸	I	2.24×10^6
镅(95)	Am ²⁴¹	I	3.24
	Am ²⁴³	I	1.85×10^{-1}
锑(51)	Sb ¹²²	IV	3.90×10^5
	Sb ¹²⁴	III	1.76×10^4
	Sb ¹²⁵	III	1.43×10^3
氩(18)	Ar ³⁷	VI	1.01×10^5
	Ar ⁴¹	II	4.25×10^7
	Ar ^{41**} (非压缩的)	V	
砷(33)	As ⁷³	IV	2.36×10^4
	As ⁷⁴	IV	1.01×10^5
	As ⁷⁶	IV	1.56×10^6
	As ⁷⁷	IV	1.05×10^6
砹(85)	At ²¹¹	III	2.06×10^6
钡(56)	Ba ¹³¹	IV	8.7×10^4
	Ba ¹⁴⁰	III	7.3×10^4
锫(97)	Bk ²⁴⁹	I	1.80×10^3
铍(4)	Be ⁷	IV	3.51×10^5
铋(83)	Bi ²⁰⁶	IV	9.9×10^4
	Bi ²⁰⁷	III	2.16×10^3
	Bi ²¹⁰	II	1.24×10^5
	Bi ²¹²	III	1.47×10^7
溴(35)	Br ⁸²	IV	1.06×10^6
镉(48)	Cd ¹⁰⁹	III	2.55×10^3
	Cd ^{115m}	III	2.64×10^4
	Cd ¹¹⁵	IV	5.1×10^5
钙(29)	Ca ⁴⁵	IV	1.91×10^4
锎(98)	Cf ²⁴⁹	I	3.05
	Cf ²⁵⁰	I	1.31×10^3
	Cf ²⁵²	I	6.5×10^3
碳(6)	C ¹⁴	IV	4.59
铈(58)	Ce ¹⁴¹	IV	2.80×10^4
	Ce ¹⁴³	IV	6.6×10^5

(续表)

元 素*	放 射 性 核 素***	组 别	比 放 射 性 (居里/克)
铯(55)	Ce ¹⁴⁴	III	3.18×10^3
	Cs ¹³¹	III	1×10^5
	Cs ^{134m}	IV	7.4×10^6
	Cs ¹³⁴	III	1.22×10^3
	Cs ¹³⁵	IV	8.8×10^{-4}
	Cs ¹³⁶	IV	7.4×10^4
	Cs ¹³⁷	IV	9.82×10
氯(17)	Cl ³⁶	III	3.21×10^{-2}
	Cl ³⁸	IV	1.33×10^8
铬(24)	Cr ⁵¹	IV	9.2×10^4
钴(27)	Co ⁵⁶	III	3.02×10^4
	Co ⁵⁷	IV	8.5×10^3
	Co ^{58m}	IV	5.9×10^6
	Co ⁵⁸	IV	3.13×10^4
	Co ⁶⁰	III	1.14×10^3
铜(29)	Cu ⁶⁴	IV	3.83×10^6
镅(96)	Cm ²⁴²	I	3.32×10^3
	Cm ²⁴³	I	4.21×10
	Cm ²⁴⁴	I	8.2×10
	Cm ²⁴⁵	I	1.04×10^{-1}
	Cm ²⁴⁶	I	3.64×10^{-1}
	Dy ¹⁵⁴	III	1.57×10^6
镨(66)	Dy ¹⁶⁵	IV	8.2×10^6
	Dy ¹⁶⁶	IV	2.30×10^5
铒(68)	Er ¹⁶⁹	IV	8.2×10^4
	Er ¹⁷¹	IV	2.35×10^6
铕(63)	Eu ¹⁵⁰	III	1.39×10^6
	Eu ^{152m}	IV	2.24×10^6
	Eu ¹⁵²	III	1.85×10^2
	Eu ¹⁵⁴	II	1.45×10^2
	Eu ¹⁵⁵	IV	1.36×10^3
氟(9)	F ¹⁸	IV	9.3×10^7
钆(64)	Gd ¹⁵³	IV	3.62×10^3
	Gd ¹⁵⁹	IV	1.10×10^6