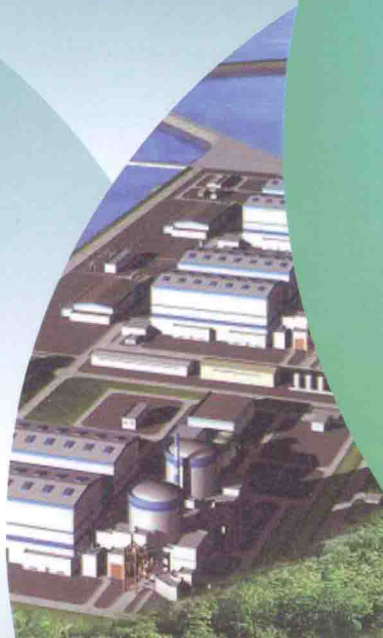


Into the Nuclear Power **走进核电**

李 日 马加群 编著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社



走进核电

李 日 马加群 编著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

走进核电 / 李日, 马加群编著. — 杭州: 浙江大学出版社, 2015. 2

ISBN 978-7-308-14400-1

I. ①走… II. ①李… ②马… III. ①核电工业—教材 IV. ①TL

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 032968 号

走进核电

李 日 马加群 编著

责任编辑 李玲如

封面设计 金定中

出版发行 浙江大学出版社

(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排 版 杭州中大图文设计有限公司

印 刷 富阳市育才印刷有限公司

开 本 710mm×1000mm 1/16

印 张 9.25

字 数 147 千

版 印 次 2015 年 2 月第 1 版 2015 年 2 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-308-14400-1

定 价 26.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部联系方式: 0571-88925591; <http://zjdxcs.tmall.com>

前 言

我国核电事业经历了从无到有、从小到大的发展过程。在这个过程中,核电人才队伍也在不断发展壮大。我国核电站建设突飞猛增,已建成并投入运营的核电站有 4 个,在建的核电站有 13 个,正在筹建中的核电站有 25 个,我国对核电人才的需求也越来越旺盛。据我们调查,在施工阶段,安装一个单机组核电站需要 2000~2700 名熟练的技术工人,这些熟练技术工人可通过中等职业学校专门培养来实现。

核电设备安装与维护专业是基于三门职业中专与三门核电站建设单位校企合作“订单教育”新开发的中等职业教育专业。该专业是培养核电站建设中所需的熟练技术工人。

核电设备安装与维护专业为浙江省中等职业教育课改第二阶段第三批改革专业,课改任务由三门职业中专承担,目前已完成专业人才培养模式、课程设置的研究和专业教学指导方案的编制及部分专业教材的编写工作。专业教学指导方案将由浙江省教育厅审核通过后实施。

《走进核电》是中等职业学校核电设备安装与维护专业入门教育读本,也是关注中国核电站建设人士的基础读本。随着我国核电产业的发展,《走进核电》还可作为普通高中选修课程教材。

《走进核电》内容分为六章:第一章介绍原子核基本知识,包括原子核和核裂变、核能的优越性与应用及核辐射的防护;第二章介绍核电站基础知识,包括我国核电站建设情况、核电站的结构和运行原理、核电站的分类及世界核电发展的现状;第三章介绍核电人才需求状况,包括我国核工业建设企业介绍,核电站建设的人才需求及中职学校为核电站建设培养人才情况;第四章介绍专业对应的职业群和职业资格要求;第五章介绍课

程教学与实训教学的安排；第六章为走进核电建设企业做好准备——在认识自己、了解职场环境的基础上做好未来的规划。

《走进核电》建议在核电设备安装与维护专业的第一学期开设，每周1课时，约需20课时。

《走进核电》由李日、马加群编著。在编著过程中我们得到了中国核工业集团三门核电有限公司政工处、中国核工业第五建设公司三门核电站项目部、中国核工业第五建设公司秦山核电站检维修项目部、成都海光核电技术服务有限公司连云港核电站项目部工程技术人员的指导以及浙江大学出版社领导和编辑的关心与指导，在此我们表示衷心的感谢。由于编著者的水平有限，书中难免有错误和不妥之处，敬请读者批评指正。

编著者

2015年1月

目 录

引子 世界上第一座原子核反应堆的诞生	001
第一章 核能与核能利用	007
第一节 原子核和核裂变	007
第二节 核能的优越性及利用	014
第三节 核辐射及防护	021
第二章 核电站基本知识	028
第一节 我国核电站建设情况	028
第二节 核电站的分类	055
第三节 核电站的运行原理及结构	068
第四节 核电站的安全保证	077
第五节 世界核电发展历程和现状	080
第三章 新时期核电人才需求状况	090
第一节 中国核工业建设企业	090
第二节 中国核电站建设的人才需求情况	097
第三节 中职学校为核电站建设培养人才情况	101

第四章 专业对应的职业群和职业资格要求	105
第一节 核电设备安装与维护专业对应的职业群	105
第二节 核电建设企业对从业者的职业资格要求	107
第五章 课程教学与实训	112
第一节 课程教学	112
第二节 校内外实训	116
第六章 为走进核电建设企业做好准备	123
第一节 认识自己	123
第二节 了解职场环境	129
第三节 规划未来	131
后 记	140

引子 世界上第一座原子核 反应堆的诞生

1942年12月2日,人类于此首次完成自持链式反应的实验,并因而肇始了可控的核能释放。

这是芝加哥大学的某幢建筑的外墙上所铭刻的文字。正是在这幢不起眼的建筑中产生了人类历史上第一个核反应堆,从此,人类进入了原子能的时代。

一、费米夫人罗拉的回忆

在芝加哥大学的校园里,有一所破旧而古老的建筑。有个像炮塔和城垛的足球场的西看台。第一座原子核反应堆就是在这看台下面的室内网球场里,由一个科学家小组建造的。当时,离指望达到目标的日期异常紧迫,他们都以最快的速度,在极端保密的方式下,进行着这件工作。那时,第二次世界大战交战正酣,在网球场里工作的那些人,心中明白他们的探索将使得原子武器的研制成为可能。经过极为艰苦的努力,他们终于成为第一批目睹物质确可完全按照人类的意愿而放出其内部能量的人。在这当中,我的丈夫费米是他们的领导者。

1939年1月16日玻尔到美国普林斯顿高级研究所和在那里工作的爱因斯坦探讨铀裂变问题。然后,又和费米在华盛顿大学举行的一次理论物理学会议上交换了各自的研究心得。在这次交谈中,关于链式反应的概念开始成型。

3月,在哥伦比亚大学工作的费米、津恩、西拉德和安德森等人,进行

试验以确定铀核裂变的所释放出的中子数目到底是几个。实验结果表明,铀核在裂变时能够释放多于两个的中子,因而铀原子核一个接一个分裂的链式反应应该是可以实现的。至此,在理论上能否实现核分裂链式反应的问题已经得到基本解决。由于纳粹德国也在沿着这一方向进行研究,聚集在美国的各国著名科学家们强烈地预感到,美国政府应该利用这一最新科研成果,开始研制一种威力强大的原子武器,而且必须赶在德国人前面。

现在,需要费米全力以赴的是建造一座能产生自持链式反应的原子核反应堆。

1941年7月,费米和津恩等人在哥伦比亚大学开始着手进行石墨—铀点阵反应堆的研究,确定实际可以实现的设计方案。

12月6日,即日本偷袭珍珠港的前一天,罗斯福总统下令设置专门机构,以加强原子能的研究。此时,康普顿被授权全面领导这项工作,并决定把链式反应堆的研究集中到芝加哥大学进行。1942年初,哥伦比亚小组和普林斯顿小组都转移到芝加哥大学,挂上“冶金实验室”的招牌。这就是后来著名的国立阿贡实验室的前身。

在芝加哥大学的这个“冶金实验室”里,费米所领导的小组主要是设计建造反应堆。他们既有分工又有交叉,自觉地、有条不紊地进行着实验研究和工程设计工作。

在建造并试验了30个亚临界反应堆实验装置的基础上,最后才制订出建造真正反应堆装置的计划。

1942年11月,这个反应堆主体工程正式开工。由于机制石墨砖块、冲压氧化铀元件以及对仪器设备的制造很顺利,工程进展很快。费米的两个“修建队”,一个由津恩领导,另一个由安德森领导,几乎是昼夜不停地工作着。而由威尔森所领导的仪器设备组,也是日夜加班,紧密配合。

反应堆一天天地朝着它的最终形象增长。为它工作的人们,神经紧张的程度也在增加。虽然从理论上说,他们明白:在这反应堆里,链式反应是可以控制的,但毕竟是第一次,是不是可控还得用实践来证明。

费米教授头脑机敏,遇事果断。他对一些重大的技术问题,虽然已胸有成竹,但总与周围的人商量如何处理更好。只要是正确的、好的见解,不管是谁提出的,他都采纳。所以,他的助手们形容他是“完全自信,而毫

不自负的人”。费米一直亲临建造现场,根据工程进展情况和实测结果,证明原来的设计是那么精确。他能够预言出几乎完全精确的石墨—铀砖块的数目,这些砖块堆到了这个数目,就会发生链式反应。

12月1日中午刚过,测量表明,链式反应马上就要开始了。最后一层石墨—铀砖块放到反应堆上,津恩和安德森一起对反应堆内部的放射性做了测量,认为只要一抽掉控制棒,链式反应就会发生。两人商定先向费米汇报情况,然后再进行下一步的工作。当晚,费米向所有工作人员传话:“明天上午试车。”12月2日(星期三)上午8点30分,大家聚集在这间屋子里,北端阳台东头放着检测仪器,费米、康普顿、津恩和安德森都站在仪器前面。反应堆旁边站着韦尔,他的职责是抽出那根主控制棒。

9点45分,费米下令抽出电气操纵的控制棒。

10点钟刚过,又令津恩把另一根叫“急朴”的控制棒抽出。

接着,命令韦尔抽出那根主控制棒。由于安全点定得太低,自动控制棒落下来了,链式反应没有发生。时为11点35分。因为控制棒能吸收中子,中子数下降就会使反应暂时中止。

午后,韦尔对控制棒的安全点做了一些调整。

下午3点过后,费米一面盯着中子计数器,一面命令韦尔抽出那根主控制棒。费米说:“再抽出一英尺。”“好!这就行了。”接着对一直站在他旁边的康普顿教授说:“现在链式反应就成为自持的了。仪器上记录的线迹会一直上升,不会再平延了。”此时正是1942年12月2日下午3点25分。

当这世界上第一座原子核反应堆开始运转之际,在场的人们聚精会神地盯着仪器,一直注视了28分钟。

“好了!把‘急朴’插进去。”费米命令操纵那根控制棒的津恩。立刻,计数器慢下来了,反应停止了,时为下午3点53分。

此时此地,人们心潮汹涌澎湃,激动万分。费米刚一宣布反应停止,理论物理学家威格纳就把早已准备好的一瓶吉安提酒递上来。费米启开瓶盖,向大家分发了纸杯。科学家们为自己是最早的成功者,互相祝贺,并在这瓶酒的商标纸上签了名,这一举动成了事后考证有谁参加这次实验的唯一书面记录。

世界上第一座原子核反应堆被命名为“芝加哥”第一号CP-1。

二、CP-1 的结构

CP-1 和现在的反应堆结构不同,它没有压力容器,它由铀及铀氧化物冲压块和石墨块堆叠而成。因为材料确实是一块块堆垒起来的,其总重量达到 7 吨以上,所以才称之为反应“堆”,如图 0-1 的素描图所示。铀元素作为裂变反应的燃料,石墨用以把中子减慢到热中子速度,在那样慢的速度下,中子更容易被铀吸收,因此裂变会更容易引发。反应堆中装有镉棒,其吸收中子的能力很强,用以在裂变反应开始前吸收中子,避免链式裂变反应急剧发生。在堆外设计了中子计数器,用以检测链式裂变反应是否实现了自持,如图 0-2 所示。

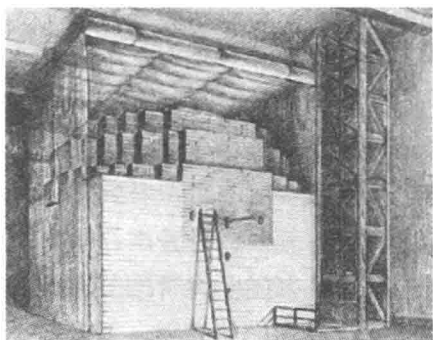


图 0-1 世界上第一座原子核反应堆

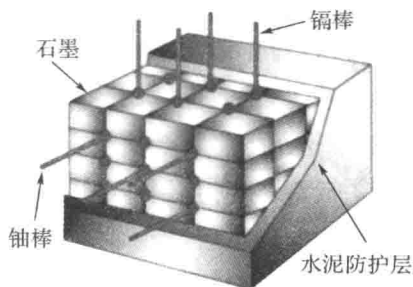


图 0-2 核反应堆结构

核能是最现实可行的新能源。我们相信随着国际间的和平发展和国际公约约束力量的加强,广岛、长崎原子弹轰炸的悲剧不会重演,核子武器会永远从战场上消失。原子核会源源不断地为人类提供清洁,可靠,安全的能源。

【资料链接】

伟大的科学家费米

费米(1901—1954),美籍意大利裔物理学家,出生于罗马,图 0-3 是费米像。读书时费米是一个出类拔萃的学生,不满 21 岁的他就在比萨大学以有关 X 射线的衍射优秀论文获得理学博士学位。1926 年他任罗马

大学物理学教授时,年仅 26 岁,主要从事固体中电子统计规律的研究。当时的他发表了第一篇关于量子统计学规律的重要论文。这篇论文中,费米以量子统计学来描述某类粒子大量聚集的行为。之后,这类粒子人称费米子。

1933 年费米提出了 β 衰变学说,对中微子和弱相互作用首次作了定量分析。1932 年英国物理学家詹姆斯·查德威克发现了中子。这使费米产生了极大的兴趣,因为中子可以实现许多新的核反应。费米注意到,在引发核反应时,中子先通过石蜡和水则特别有效。中子在通过这



图 0-3 费米像

些物质时,多次碰撞,能量大量损失,也就是说,能量越小的中子,核反应能力就越大。

1938 年,费米由于对中子吸收做了重要的研究获得诺贝尔物理奖。但是就在这时他却在意大利遇到了麻烦。他的妻子是犹太人,意大利法西斯政府颁布出一套粗暴的反对犹太人的法律,而费米本人又强烈反对法西斯主义——墨索里尼的独裁统治。1938 年 12 月,他前往斯德哥尔摩接受诺贝尔奖,此后就没有返回意大利,而是去了纽约。哥伦比亚大学主动为他提供职位,并为自己的师资队伍中增添了一位世界上最伟大的科学家而感到自豪和骄傲。1944 年费米加入美国籍。

1939 年初,据李泽·梅特纳、奥特·哈尔姆和弗里茨·斯特拉斯曼报告,中子被吸收后有时会引起铀原子裂变。这项报告发表后,和其他几位主要的物理学家一样,费米立即认识到一个裂变的铀原子可以释放出足够的中子来引起一项链式反应。费米还预见到这样的链式反应可用于军事目的潜在性。费米意识到铀的连锁反应就是炸弹,而且是一种新的威力无比的炸弹,它可以把千万条生命瞬间烧成灰烬!费米一想到这里,心中不禁打了个寒噤,要是德国的希特勒、意大利的墨索里尼这两个战争狂人掌握了这个秘密,那人类将遭受多大的灾难。

后来,从匈牙利逃到美国的西拉德等科学家找到了费米,决定起草一

封给罗斯福总统的信,请爱因斯坦签名,敦促美国筹划研制原子弹的工程计划。这个建议被罗斯福所采纳,并且把研制原子弹的计划称为“曼哈顿工程计划”。但当时在美国的费米一家已经成为敌国侨民,因为他来自法西斯一方的意大利。美国战时的宪法规定,这些敌国侨民的言行将受到限制。制造原子弹,必先建造核反应堆。因为设计原子弹所需要的许多重要数据和机理,必须事先在反应堆的实验中取得。核计划的主要负责人康普顿教授向政府部门竭力推荐费米,强调要搞反应堆研究一定要费米才有这个领导能力。幸运的是推荐获准,费米着手领导建设第一座核反应堆。

1941年7月,费米和津恩等人在哥伦比亚大学,开始着手进行石墨—铀点阵反应堆的研究,确定实际可以实现的设计方案。1942年11月,费米出其不意地在芝加哥大学运动场的西看台下忙碌起来。1942年12月2日,在费米指导下设计和制造出来的核反应堆首次运转成功。1945年7月,费米参加了世界上第一颗原子弹爆炸试验,并获得了成功。1945年8月,两枚原子弹将日本两座城市夷为平地,夺走无数人的生命,但同时也结束了第二次世界大战。从此,核能武器的恐惧笼罩着整个世界。

1945年费米被聘为芝加哥大学核研究所教授。他在一生中写出过250多篇科学论文。杨振宁、李政道、盖尔曼和张伯伦等著名物理学家都是他的学生。

费米晚年也非常反对核子武器的使用,尤其是听说比原子弹威力更大的氢弹爆炸成功时,他极力反对这种大规模毁灭性的杀伤武器的使用。费米1954年11月刚刚接受了以他名字命名的费米奖金不几天,便溘然长逝,年仅53岁,这与他在工作中受到较多的核辐射有关。非常遗憾,这位科学巨人并没有亲眼见到原子能的和平应用。为了纪念他对核反应的巨大贡献,100号化学元素镅就是为他而命名的。

毋庸置疑,费米是20世纪最伟大的科学家之一,在理论和实验两方面都有惊人的成就。他的发明曾经对人类带来过巨大的灾难,也正被人类和平利用提供能源造福万代。

第一章 核能与核能利用

第一节 原子核和核裂变

物质由分子组成,分子由原子组成,原子由原子核和核外电子构成,原子核由于衰变和核反应会变成新的原子核,并释放出巨大的能量,原子弹以及核电站的能量来源都是核裂变。

一、原子和原子核

1. 原子、原子核、电子

原子是化学变化中的最小粒子。原子由原子核和核外电子构成,原子核内有质子、中子,还有其他基本粒子。图 1-1 是原子的结构示意图。

原子核是原子的组成部分,位于原子的中央,占有原子的大部分质量。组成原子核的有中子和质子。当周围有和其中质子等量的电子围绕时,构成的是原子。原子核极其微小,如果原子是一个足球场,那么原子核就是足球场中的一只蚂蚁。且原子中的质子分布不均。

电子是一种最小的带电粒子,也是最早被人们发现的基本粒子,带负电,电量为 1.602189×10^{-19} 库仑,是电量的最小单元;其质量为 9.10953×10^{-28} 克,常用符号 e 表示。电子在原子中,围绕于原子核外,其数目与核内的质子数相等,亦等于原子序数。

2. 原子核内蕴藏着巨大能量

原子核虽然很小,但它内部蕴藏的能量却不小。例如核电站所用的

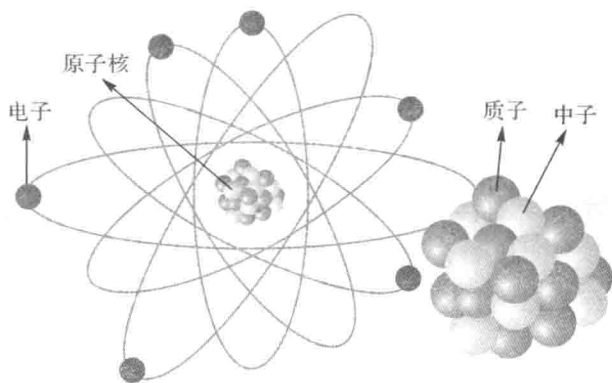


图 1-1 原子的结构

核燃料铀 ^{235}U ,如果让 1 千克 ^{235}U 的原子核全部裂变,则它可以释放出相当于 2700 吨标准煤完全燃烧所放出的能量,如图 1-2 所示,由此可见原子核内蕴藏着巨大能量。

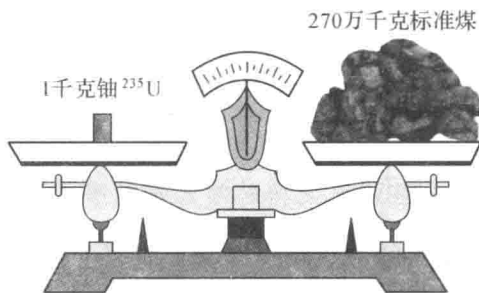


图 1-2 原子核内蕴藏着巨大能量

二、原子核的转变

1. 核衰变

核衰变,原子核自发射出某种粒子而变为另一种核的过程。

核衰变有三种:

(1) α 衰变。原子核自发放射 α 粒子的核衰变过程。

(2) β 衰变。原子核自发耗散其过剩能量使核电荷改变一个单位,而质量数不改变的核衰变过程。

(3) γ 衰变:处于激发态的核,通过放射出 γ 射线而跃迁到基态或较低能态的现象。

2. 核反应

原子核由于外来的因素作用,如带电粒子的轰击、吸收中子、高能光子照射等引起核结构的改变并形成新核的过程。

(1)核裂变,又称核分裂(见图 1-3)。裂,即分裂,是一个变多个,是一个原子核分裂成几个原子核的变化。只有一些质量非常大的原子核像铀 U、钚 Pu 等才能发生核裂变。

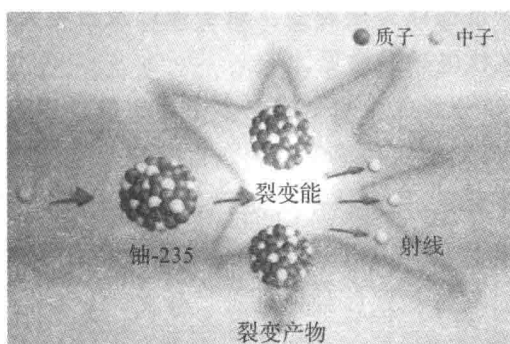


图 1-3 核裂变

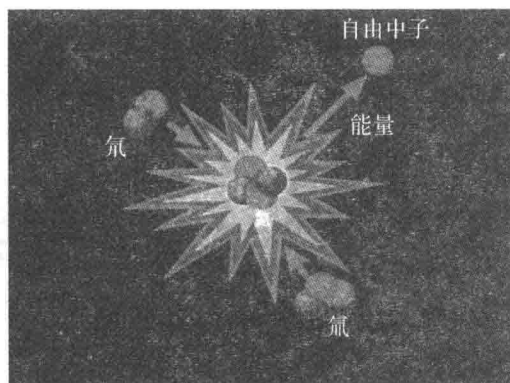


图 1-4 核聚变

(2)核聚变,又称核融合(见图 1-4)。聚,即聚集,是多个变一个。核聚变的过程与核裂变相反,是由几个原子核聚变合成一个原子核变化。

只有一些质量小的原子,比方说氘和氚,在一定条件下,发生核聚变。图 1-4 是核聚变示意图。

三、核裂变

1. 核裂变

只有一些质量非常大的原子核像铀 U、钚 Pu 等才能发生核裂变。这些原子的原子核在吸收一个中子以后会分裂成两个或更多质量较小的原子核,同时放出二个到三个中子,还有 β 和 γ 射线和中微子,并释放出巨大的能量,这一过程称为核裂变。原子弹以及核电站的能量来源都是核裂变,铀裂变在核电站最常见。

一个重原子核分裂成为两个或更多中等质量碎片的现象。按分裂的方式裂变可分为自发裂变和感生裂变。自发裂变是没有外部作用时的裂变,类似于放射性衰变,是重核不稳定性的一种表现;感生裂变是在外来粒子(最常见的是中子)轰击下产生的裂变。

【资料链接】

铀及铀同位素的分离

一、铀

铀是一种带有银白色光泽的金属,比铜稍软,具有很好的延展性,很纯的铀能拉成直径 0.35 毫米的细丝或展成厚度 0.1 毫米的薄箔。铀的比重很大,与黄金差不多,每立方厘米约重 19 克,像接力棒那样的一根铀棒,竟有十来千克重,如图 1-5 所示。

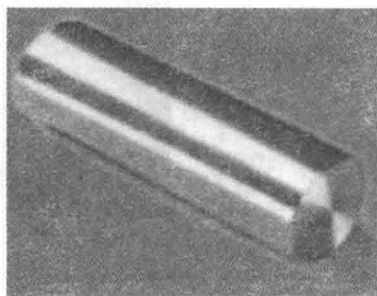


图 1-5 铀棒

1. 铀的三种同位素

铀是存在于自然界中的一种稀有化