

第二届和平利用原子能国际会议文献

核动力厂及反应堆工艺

4



中国科学院原子核科学委员会编辑委员会编辑

科学出版社出版

核动力厂及反应堆工艺(4)

中国科学院原子核科学委员会編輯委员会編

※

科学出版社出版 (北京朝陽門大街 117 号)

北京市书刊出版业营业登记证出字第 061 号

中国科学院印刷厂印刷 新华书店总經售

※

1961 年 12 月第 一 版

书号: 2431 字数: 99,000

1961 年 12 月第一次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

(京) 0001-1,000

印张: 4 1/4

定价: 0.54 元

目 录

P/262	英国原子核动力发展计划·····	1
P/301	英国原子能局工业组的某些经验·····	9
P/1016	单域热中子动力反应堆中的燃料循环·····	18
P/1028	计算核反应堆外部包容结构的比例模型试验·····	54
P/1407	巴基斯坦核动力的未来远景·····	63

英国原子核动力发展计划*

W. 斯特拉塞(Strath)**

1. 核动力与英国经济

战后联合王国的主要经济问题在于保持本国生产的迅速增长以免陷入收支不能平衡的困难中。这种困难部分地是由于内部产生的通货膨胀,部分地也是由于需要靠输出商品来支付食物、燃料和原材料的进口,而不依赖于联合王国所掌握的、在战争期间已经消耗了一部分的外汇。从我们(英国)原有的燃料资源来扩大生产的成本高,使得这个问题更加严重了。因为生产水平已经提高,对能量的需要增加了,致使我们(英国)不得不输入最低限度的能量。

1.1 对能量需要的增长

十九世纪时,煤炭产量增长非常迅速,不仅能够维持国内生产的飞快发展,而且是平衡英国向外投资支付余额的主要来源。进入二十世纪以后,这种债权者的地位衰落下来,最后完全变成了相反的情况。1913年,英国煤产量达到了289亿吨的最高峰。10年以后,煤的出口与库存达到1亿吨的最高峰。1936年煤的出口量仍然是4600万吨,然而各种燃料的进口总值第一次超过了出口。1941年联合王国已成为在所有燃料方面(折算为煤的等价吨数)的进口国了。到1957年,它所消耗的能量折算成煤的等价吨数为2.46亿吨,其中约2000万吨是靠进口的。1954年—1957年的最近四年中,减去了出口之后的燃料进口总值平均每年为两亿五千万英镑左右。在能量生产增长很小或者没有增长的情况下,联合王国经济的继续发展将给支付平衡带来严重的负担。据估计,如果直到1975年止英国的工业平均每年增长3—3.5%的话,那么在1965年联合王国的能量需要量将达到相当于2.9—3亿吨煤,在1975年则为3.6—3.75亿吨煤。

这一较长远的估计必然是不精确的,但如果我们(英国)的经济象我们所希望的那样发展下去,那么对能量的需要就一定会达到这个数字。当然,在稳步上升的总趋势中、短期性的变动还会发生的,事实上最近三年工业生产水平就没有增长。但是,我们相信这种情况是暂时的。并且我们的经济发展以及与此相应的对能量需要的增长将会继续下去。诚然,也必需是如此,如果英国还想再保持先进工业国地位和提高生活水平的話。

目前正在实行的煤炭投资计划为煤矿提供8.6亿英镑的资金。资金的大部分要求用来开掘新井以代替那些容易开采而即将采空了的煤层。但是这个计划要在1965年才能把煤产量从1957年的2.24亿吨提高到2.4亿吨。这就是说,仅提供了在这段时期内所需要的能量的增加量的三分之一。即使在1965年以后所计划的投资率能够实现,煤炭还不能提供预计的在1975年时对能量所需要的增加量的五分之一。联合王国实际上没有

* 第二届和平利用原子能国际会议文献, A/CONF. 15/P/262, 联合王国, 1958年6月13日;原文:英文。

** 联合王国原子能局。

自己的石油資源,也仅有很少几处适合于水电建設。虽然可以,并正在通过改进鍋炉和其他固体燃烧炉的热效率来节省一些煤炭,但这并不能对能量的严重情况起多大作用。所以,即使煤炭产量按计划增长,1975年所需要的全部能量的三分之一还是必須依靠进口。

在今后的廿年中,对能量需求的增加大部分(发动机用燃料除外)将集中在电力上。1957年,用于发电消耗了5000万吨煤或相当于5000万吨煤的燃料。到1965年估計将为7000万吨煤或相当于7000万吨煤的燃料。到1975年将需要1亿到1.1亿吨。如果不使用核动力,則所增加的5000万到6000万吨的煤或折合成相当于这个数量的煤的其他燃料需要靠进口来解决。

1.2 進口价格

对今后几十年内能量困难迅速加剧的預計,以及煤和石油之进口价格的昂貴和无保障,是我們(英国)需要找寻其他能源的原因。核动力发电提供了这个新能源,它的燃料可以大部分从英联邦成員国那里进口。尤其是,按它能释放出来的热量計算,购买鈾比购买煤炭對我們在支付上的負担要輕很多。一吨鈾,其进口价格譬如說是一万英鎊或更少,在热效力为27%的那些最早的发电站里能放出300万(瓩·天)的热能,可以产生81万(瓩·天)的电能。如果进口煤的价格譬如說是一吨7英鎊,那末买一吨鈾的錢可以买1400吨煤;即使用发热量高的煤,并且热效率是34%,1400吨的煤也仅能产生14.5万(瓩·天)的电能,与此比較,花同样的外汇去买鈾可得到81万(瓩·天)的能量。这样如用进口燃料以产生同样的电能,用鈾的费用仅是用煤的费用的18%。在这一比較中还没有考虑到当鈾燃烧时可以产生钷,它也可以代替进口的燃料。如果我們考虑了钷的生产,那么每进口一吨鈾就可以得到1000万(瓩·天)或更多的热量,这样鈾的进口成本要比煤的5%还要少。因为实际上需要在开始时建設反应堆和管路系統,鈾的进口額在反应堆的全部寿命期内并不是完全一样的。这样,支付上的負担要比上面所說的大些,但在整个的长时期内,鈾的进口成本为較低的总效益还是会得到的。

1.3 联合王國的核动力

关于实现核动力计划方面的科学与技术的进展已經在过去叙述过,并在1955年的日内瓦會議上作过几篇报告。英国工业机构也贊同这一计划的实施。重型的电力工业,包括許多拥有雄厚技术力量与經濟力量的大公司,已发展到足以应付国内的电力增长需要与应付对外貿易的迅速扩大;其中的不少公司甚至已經获得了在温德斯凯尔(Windscale),卡尔德·哈尔(Calder Hall)及其他地方建設国家的反应堆及其附属设备的若干經驗。

对卡尔德·哈尔型的发电动力反应堆的研究刚开始,很快就明白了,建設大型的反应堆会更合乎經濟要求;事实上,只有当这第一个动力反应堆的規模是很大的时候才有希望和其他类型的动力生产相竞争。正因为这样,它的投資费用要比一般的发电站高許多許多,因此只有当它工作在尽可能大的强度,即發揮它的最大作用的时候,核燃料成本低廉的效益才能够显露出来。由国家統筹规划一个大小合宜的基本負荷是制訂核动力计划的先决条件。

当1955年2月第一个核动力计划在白皮书上发表的时候,已經进行了許多工作并取得了一些工业方面的經驗。这个計劃規定,到1965年年底一共要建設总輸出功率为1.5—2兆瓩的十二个原子发电站,包括附属工厂和第一次装入的燃料在內預計需要花費3亿英鎊。据估計,如果在基本負荷的情况下运轉,到1965年这些发电站一年将可节省5—6兆

吨的煤炭(即是生产这些电力所需要消耗的煤的数量)。

从卡尔德·哈尔反应堆的建造当中所取得的经验,对这个反应堆运转所作的研究,以及大规模的工程技术的采用,使得计划里所要建造的第一批发电站比在原计划中所规定的输出功率有可能要设计得更高一些。鉴于这方面的技术进展以及对国家的能量地位的重视,政府于1957年3月公布了一个扩充了的核动力计划。所要建设的原子核能发电站其总容量大约从1.5—2兆瓩提高到5—6兆瓩,更精确的数字则要取决于技术发展的速度、投资的方针,以及天然资源和经济资源的有利条件。如果在基本负荷的情况下运转,则相当的节省下来的煤炭估计一年可以达到1500至1800万吨。

1965年以后继续按这个速度建设下去的问题尤其有赖于投资成本的不断下降;1965年以后投入生产的发电站将必然在更低的负荷系数下工作,因为基本负荷将不会大到足以保持这些发电站都能连续不断地运转。如果能使投资成本下降,那么就可以把这个计划继续扩展到1975年。到那时,或许可以装备起来总容量达2000万—3000万瓩的核能发电站。这样,在联合王国所需要的电力中,在1960年将有约25%,1970年将有(50—70)%是由核能供给的。从国家所需要的总的能量来说,核能部分将从1960年的5%提高到,比如说,1975年的(15—20)%。

去年公布的扩大计划是有条件的,就是说,有赖于自然资源和经济的有利条件。在10月时,政府曾决定限制公家的投资额以便减轻国内通货膨胀的压力。核动力计划需要贯彻这一节约措施。于是就决定把这个扩大了的核动力计划向后延长一年。

1.4 科学机构与工业的配合

计划的制订与执行要求英国原子能局与工业最紧密的配合。核能发电站的建设需要各种不同的工业技术;但是发电站的各个部分是联系得如此紧密,以致无论设计和施工都要求高度的合作。为此(特别是第一批发电站,当时工业第一次担当这项任务),在1954年秋天四个集团公司成立起来了。每一个集团公司包括有一个重型发电设备制造厂,一个锅炉制造公司,一个土木工程公司。这些企业组织接受原子能局的训练,随后承包第一批核能发电站的建设。从那时起,和以前的四个公司集团一样,又成立了一个第五集团,同时,对核动力感兴趣的其他团体也出现了。在这个大会的报告中,有最初成立的四个公司集团的代表报告他们在设计布来得威(Bradwell),贝克莱(Berkeley),汉得斯顿(Hunterston)和欣克来·朴舍脱(Hinkley Point)动力发电站时的成功的工作,以及在建造这些发电站方面的最新经验。

原子能局与工业方面的合作并不依赖于保证履行生硬的条款或预先划定的分工。在纯科学、应用科学的设计研究和建造实验性与工业性反应堆之间的界限是不能截然划分的,而科学机构与工业以及其他等方面所担当的任务自然也是互相重叠着的。必须要有有成效的配合与共同的努力。

纯科学的研究主要由大学与原子能局的研究机构来进行。然后由原子能局的研究机构和工业机构去研究反应堆的各种新类型,通过实际的研究与反应堆实验进而建造实验性反应堆。工业企业公司经常关注着研究的进展,它们承担具体的建造任务并由科学机构详细设计出来的实验性反应堆提供设备。它们在实验性反应堆的建造过程中和建成后受到训练;依据所得经验,并基于实验性反应堆的普遍原理,这些公司就完全可以设计动力反应堆,同时在与学会紧密的联系下建设这些发电站。这当然不排除工业方面按

自己的打算去进行基本科学与应用科学的研究；例如，工业企业組織正在与原子能局和中央电力部合作进行着一个实验工作的可行计划，以完成对设计动力反应堆有基本意义的对原子核基本数据的更详细的研究。

2. 联合王国反应堆发展计划

2.1 反应堆发展计划的目标

在上述基础上就可以来考虑英国反应堆发展计划的目标以及我们如何实现它了。主要的目的，始终是，要降低大型电站的电力生产成本以满足国家对能量的需要，为要达到这个目的，可以从两方面着手进行：降低投资费用和提高燃料的利用值以降低燃料成本。虽然，当我们讨论这个问题的时候，工作已经在那里作了，但是把这两个目的看作是相互紧密联系的（虽然它们彼此有一定的独立性）以及反应堆设计者必须把为不同目的设计的反应堆系统看成是一个整体仍是有益的。在两者之中，前者——降低投资费用——更加重要。目前投资费在整个核能电力成本中所占的比例是如此之大以致看来在这个领域中的改进将能更多的取得成效。尤其是，早期的核能电站的经济计算是在比较高的负荷系数的基础上的；所以我们自然必需从巨大的投资当中去寻求我们所能寻求到的绝大部分。将来，预计多数的核能电站将要在较低的负荷系数的情况下运转，这使得降低投资费用，更加重要。

另一方面，较低的成本意味着需要进一步改进燃料元件。更高级的燃料需要更大的传热面积，因此现在的粗铀棒将被细棒组或片组所代替。与此同时，更高的气体温度及更长的燃烧时间需要强度更高的、往往也是难于加工的金属所制成的套筒；于是燃料浓集度的增加将属完全必要。这样燃料的每吨价格一定是非常高的，因此如何大大地提高从每吨燃料中所可取得的热量就更加重要了。如果我们能够在这个方面提高燃料的利用率，即使用更加精巧的燃料元件而不提高其成本，那我们就作得太好了。真的，我们甚至可以作得更好一些，同时降低燃料的成本与反应堆的投资，这是很可能的。

包括厂址准备与燃料费用在内，我们的第一批民用发电站的原投资费用每瓩输出容量超过了 120 英镑；对已经作了一些设计改进使它降低到每瓩接近 100 英镑并且再稍微降低一些还是可能的。更大的降低投资则需要对设计作根本的改变，例如用我在下面将会谈到的气体冷却反应堆。它和它的在市场上的强有力的竞争者将会在 1960 年把投资费降至每瓩 75—80 英镑的样子。到 1970 年，我们的目的是进一步降低 20% 至 25%。随便那一步也不是轻易就能做到的，需要经过巨大的努力，但是向这个方向的迈进是完全有希望的。

反应堆系统的投资愈是降低，燃料元件就愈是复杂；在上面大体提到的各个重大改进之间或改进之中都会是普遍如此。虽然重大的改进会接受甚至欢迎在燃料元件设计和制造方面的更加复杂化，但这是有一定限制的，那就是说，它对一定的反应堆系统是否值得是有限制的。事实上，对于一定的系统存在着一个降低资金的可靠办法，例如，在更高的温度和更高的负荷系数下运转，就可以抵消因提高燃料所增加的成本。例如，分别用延长燃料的燃烧时间和尽可能地提高温度的办法来提高发电站的输出及降低每单位瓩的投资费，就必需使用不锈钢套筒。由于套筒对中子的吸收就必需使用浓集燃料。在今天的核燃料的技术情况下，这种燃料的价格的增加要比它所能放出来的热量多得多。

2.2 卡尔德·哈尔反应堆系统

我們(英国)的反应堆计划的第一个目的必須是使将要建設的大多数反应堆都能成功(与卡尔德·哈尔反应堆比較),在計劃中所要建設的第一批反应堆在設計和完成方面所作的改进已在前面提到过了。卡尔德·哈尔反应堆的設計前和設計完成后的工作显示,这个气冷石墨減速反应堆还有許多可加改进的潛力。我們相信,在保持現在的套在鎂合金里的天然鈾不改变的前提下,我們仍能作出一些改进。在提高温度和增高发热量方面仍然有改善的余地,虽然这方面也有一定的限制,即需考虑到鈾棒达到高温时需要把它放在鉬套筒內。新的传热面积、更高的压力、以及修改了的設計都将提高效率。关于我們最近的工作成就以及对将来的展望的报告已經写成几篇論文,在以后将发表。如果我們使用浓集鈾和能适应更高条件的金属套筒,那么就可以通过繼續提高温度和燃料利用率的办法来达到进一步的改进。为此,我們嘗試使用氧化鈾燃料和鉬套筒,这样就可以使引出来的气体温度达到 550°C 。陶质由于燃料在照射下的高度稳定性,燃烧效果最后可能提高到6000百万瓦一天/吨。原子能学会現在正在进行一个这种类型的改进了的气体冷却式反应堆的設計工作,并且很快就要开始建設。我們希望我們的工作能得到电力部的充分支持以便使这种类型的商业用动力反应堆的建造工作縮短到,比如說,1965年完成。在这方面以及在其他方面改进了的气体冷却反应堆的經濟計算已經在莫尔(Moore),格朗日(Grainger),康伯日(Kronberger)的論文中介紹过¹⁾。

2.3 60年代的各种不同类型的反应堆系统

我們(英国)沿着气体-石墨系統的道路前进,因为我們确信它将为我們所努力的目标的一些进展提供最好的前景。无疑問,我們不能效仿美国那样全面的向前推进,他們正在一个广闊的范围内积累着經驗,而且在他们国内一般燃料的供应也不如英国那样紧张。此外,可以用来实现英国核动力計劃的技术力量及經濟力量也不能支持我們去建造許多不同类型的反应堆,每一个这样的反应堆都可能牵涉到发展新材料品种和供应昂貴实验設備的庞大計劃。我們必須选择一条主要的努力道路,并以最大的速度沿着这条道路前进;利用从集中主要力量所进行的設計中取得的經驗再向着其它不同但又有联系的类型前进。

尽管有这些限制,我們並沒有也不應該把我們的全部力量都集中在气体-石墨系統方面。我們正在研究的改进了的气体冷却式系統提供了很大的发展潜力并且我們相信它的发电成本将比第一批动力反应堆低得多。可是这些投資成本确实依赖于在关于气体-石墨系統的論文中所注意到的那些問題的成功解决,而且很有可能我們所努力进行的改进不一定会得到所希望的經濟效果。由于这些理由,原子能局認為必須在一些其他类型的、在60年代里也可能比第一批电站生产更便宜的电力的反应堆系統方面作一些努力。

为此目的,原子能局已經广泛研究了一种可能的系統是鈉冷却石墨減速反应堆。一个全面的設計研究已在1957年完成。这个系統向获得尽可能低的投資成本的目标跨进了一大步。看来建造一个大型(400百万瓦或更大)的和有相当的經濟指标的系統並沒有什么困难。考虑到鈉冷却剂的优良传热性能和异常高的工作温度,一个37%的更高热效率似乎是可能的。其結果是,比現有的气体-石墨系統的設計更低得多的投資成本看来是

1) “气体冷却式动力反应堆設計的改进”。(本會議312号报告)

可能的(預計气体-石墨系統每瓩 100 英鎊以上,而鈉-石墨系統則可能仅每瓩 75 英鎊)。另一方面,这种反应堆的設計异常复杂(由于维护与防护所产生的問題),并且鈉在与其他反应堆材料的竞争方面也存在很大問題,尤其是,鈉的使用将引起中子的浪费,因此又需要使用更高度浓集的燃料。从英国的鈾提炼工厂(用按照英国价格的电力)所生产出来的鈾-235 的价格是比较昂貴的,因而燃料成本将高于經濟計算的許可。

部分是由于这个原因——浓集鈾成本的昂貴,原子能局目前沒有在大型的水減速反应堆方面付較大的努力以及大規模生产动力;虽然如此,由于它的高发热率和低的成本的可能性使得美国把这种系統列入了計劃之內。

因此,最近原子能局研究了另一种系統,我們相信它在 1960 年以后作为商业用反应堆是有发展前途的。这种系統仍然是气体冷却式的,但以重水为減速剂。它提供有建造大型反应堆,例如 500 百万瓦的可能。但因重水的成本很高,这种系統的投资費将比鈉-石墨系統还要高;它可能比气体冷却系統的投资稍高不多,如果后者在各方面的节省都达到我們所期望的那样的話。在另一方面,这种系統結構簡單,因为不需要承受高压容器,同时用重水作減速剂还可避免一些問題,例如用石墨时的氧化問題和能量的被石墨所貯存問題,所以这种系統的维护比較容易。如果目前正在进行的研究工作証明行的話,原子能局可能将很快的开始設計和建造一种这样的实验性或示范性的反应堆。

2.4 船用的和出口的小型反应堆

原子能局的反应堆計劃的第二个主要目标是从事比适于英国核动力計劃的反应堆要小得多但在經濟上可以与一般动力相竞争的小型反应堆的研究。这种小型反应堆用于船舶动力最为理想,同时也适宜于向比英国所需要的动力較为少量的一些国家出口。

然而,船用反应堆遇到一些特殊問題:反应堆核心必須紧实坚固;防护层的重量减少船只的容量;为了减小燃料的容积需要較高的发热率,而这又使反应堆本身产生一些問題,例如如何克服反应堆停閉时能致降低功率和提高負載的有害的氙的形成;由于船只的运动使反应堆受到应力而产生一些特殊問題;最后,为了避免放射性对人员的伤害,还需要特殊的防护設備。关于这方面的問題——船用反应堆的研究和建造,在这个會議的另外两篇論文中将叙述¹⁾。

反应堆的紧实需要浓集燃料。只有当燃料能够便宜的获得时,这种反应堆才有可能与其他动力相竞争,在英国,只有当民用动力反应堆生产出钷来以后这个条件才能实现。

对英国來說,对核动力推进的經濟問題可能有一个临时的解决办法:在价廉的核燃料的获得以及以钷为燃料的反应堆有实用价值以前,其他类型的系統可能被临时用来作为最好的且也是較早能以利用的經濟推进动力。于是原子能局目前正在嘗試使用改进了的气体冷却系統,或者如果可能的話,气体-重水系統作为船舶的核能推进动力。这些系統,即使体型較小,也只需要較普通水系統用浓集度低得多的燃料;但反应堆的体形必为較大者,因而只有用于,比如說,5 万吨以上的大船上时才是經濟的。在所有的情况下,在陆地上先造一个示范性的反应堆是很必要的。当有廉价的燃料可使用时,这些气体冷却反应堆或将不再限于仅用在大船上,而一些較小的船舶使用經濟的核推进动力也将成为可能。

1) S. L. 史密斯(Smith)和 J. E. 雷查德(Richards),“商用船舶的核动力推进”,本會議 265 号报告;以及 R. V. 莫尔(Moore)和 C. E. 依里夫(Eliffe),“船舶用核动力推进”,本會議 266 号报告。

2.5 70 年代的反应堆

轉向更远的将来,我們希望在 70 年代时快中子反应堆以及由气体-石墨系統发展到最后而成的高温气体冷却反应堆的使用都成为可能。有关这些系統的論文将在大会的技术會議上发表。

这些系統是英国将要集中注意进行的长期发展工作。使用高度浓集的陶质燃料并使用固体減速剂,这样就可避免使用金属的燃料元件和外套;因而一个高温气体冷却式反应堆系統就提供在极高温下运轉的可能性,而完全有可能使这个反应堆与燃气透平連接起来使用。在这种温度下,具有浓集鈾-233 的鈾燃料元件将被証明比鈾-238 及钍更为經濟。在鈾-232—鈾-233 循环中的轉化系数可能接近于 1。这种反应堆的燃料成本会很低,因为陶质燃料的发热率高,使用時間长;这个因素再加上体形小、有关輸出的投資成本低,就使得它比起以前的各种反应堆的电力生产成本都更低。当然,关于这个系統还需要进行許多年的研究工作。

在苏格兰北部的当来(Dounreay)地方所作的快中子反应堆实验是走向最終发展成为在投資費用和燃料成本两方面都很理想的一种反应堆的一个步驟。这种反应堆在开始时装入钍之后,在包围芯部的肥料层中裂变物質的轉化系数至少可以达到 1.3。由这种反应堆实验的装备工作当中已經取得了許多关于这样一个有高效能的反应堆在基本工程設計問題上的有用經驗。同时,从这种实验工作当中还将取得有关反应稳定性和有关反应率的变化經驗。对于快中子反应堆,在今后的十年或更多的時間内还需要作許多工作,那时钍就得以从早期建造的反应堆中被辐照的鈾中取得。

2.6 热核动力

更远一些的将来,現在还說不出具体在什么时候,商业方面的动力生产将可能由可控热核反应获得。泽塔(ZETA)和賽普特(Sceptre) III 实验的进展和所取得的經驗将另外由論文的作者在这里宣布,已經証明,在 ZETA 型式的装置中的放电过程可以維持一个相当长的時間并且它是一个很有希望的型式。如用更大一些的装置和更高一些的电压,則反应温度所放出来的能量,将达到一个临界点,在这一点,整个系統所放出的能量将超过它所消耗的能量。英国原子能局現正在配备相当数量的人力和物力来发展这种系統。

2.7 一个靈活而平衡的計劃

在英国的特殊条件下,尽早的发展核动力是一件急迫的任务。但是,在一些还比較原始的反应堆系統之間过早地决定我們的大規模投資方向,以及在今天还迷惑不清的情况下寻求一条完美的(那是永远达不到的)发展方向;在作出这样的抉择时,我們必須十分慎重。当一个庞大的決議被采纳,某一个特殊类型的系統被选定将大量采用,那么就要賭上成亿的金鎊和多少年的工作。于是,我們试图使我們的計劃既坚决(意即必須按期按指标項目完成)又灵活,以期能够克服那些预料不到的障碍,并能充分利用那些意想不到的有利机会。例如,我們选择了气体-石墨这条道路,因为我們确信它能生产較低价格的电力;并且当我們沿着这条道路前进的时候,每一个新电站的設計都标志着在以前那些电站的建設中所巩固下来的經驗的基础上提高一步。与此同时,我們也正在研究一些完全新型的系統;当气体-石墨系統的发展将来达到頂点的时候,这种新型系統将会被采用。我們很清楚的知道,存在着困难因素:为了更多更便宜的动力需要,時間不够;科学人力不足;

大规模实验工作的经费不足；裂变物质不足和成本昂贵。就象它妨碍了我们一样，这些困难也将会对我们有好处（迫使我们更实际一些）。

当 1955 年 2 月在白皮书中公布了英国的第一个临时的核动力计划的时候，人们以为英国打算走所谓的“天然铀-钍路线”。这样，继卡尔德·哈尔型的天然铀反应堆之后，我们满可以建造一个以浓集了从以前的那些反应堆中所生产出来的钍作燃料的液体冷却式反应堆。这些反应堆在工作当中又能够生产出钍来，于是若干时间后就会达到年产足够的钍来满足作为快中子增殖堆所需的大量初始装入燃料的需要。这种增殖堆，由于有很高的转化系数，又可以生产出足够的钍来供应日益扩大着的动力计划所需的燃料，既不需要在天然铀方面增加更多的消耗，也不需要化费包括建立用扩散法浓集燃料的工厂在内的基本建设投资。

从 1955 年以来由气体-石墨反应堆所得的经验以及我们整个的发展计划看来，在到达快中子反应堆已得到足够的进展并能应用于商业发电的 70 年代以前，很少可能在英国采用液体冷却式反应堆。我们的工作还显示出，即使在第一批民用反应堆还没有生产出可利用的钍来以前，使用轻度浓集钍于发热率更高的反应堆还是有经济利益的。因为目前在英国的用扩散法浓集钍的工厂其成本不宜于生产更高度的浓集钍，因此浓集钍的浓集度将会不超过天然铀中所含铀-235 的量的两倍。在这些反应堆中以后则可以装入从民用反应堆生产出来的含有浓集钍的天然铀燃料；钍以后的反应堆工作于“钍平衡循环”也将是可能的，那就是把从它们那里生产出来的钍经过处理之后再行循环，在一些钍用掉了的同时，加入少量的补充，而补充的钍是天然钍就很可以了。

当然，最后我们展望到一个平衡的计划的实现，在那里，不同类型的系统将对一个相当平衡的裂变燃料总库提供或从总库中取得燃料。例如，早期的天然铀或轻度浓集钍反应堆到 1970 年每年将生产出 3 吨或更多一些的钍。到 1975 年由于从快中子反应堆中生产出附加的钍，或从钍的增殖堆中生产出铀-233 而使钍的年产量更为提高，于是就有足够数量的钍来供应相当数量的快中子反应堆或高温气体冷却式反应堆初始装入的燃料需要。一旦运转起来以后，这些反应堆每年只要装入相当少量的裂变燃料就够了。天然铀或轻度浓集钍的热中子反应堆的燃料更换仍然需要钍的继续供应。即使第一批大型天然钍民用动力反应堆有了之后，关于燃料的情况我们还是不能说得十分精确。以后的反应堆所需要的和所生产的燃料的精确情况我们更无法预计。然而，随着我们的计划的发展，我们将把那些主要是使用天然铀或轻度浓集钍的并能生产裂变物质的第一批反应堆和后来的需要大量的初始装入裂变物质的反应堆结合起来看究竟生产出来的裂变物质是多还是不够。当我们这样作的时候我们就可以更多地晓得这些反应堆对各种裂变物质的需要，就可以调整在计划中这些反应堆的采用数量以达到各种裂变物质供需的大体平衡而避免在燃料的扩散法浓集工厂方面的过多投资。这样一个转化堆-增殖堆-燃烧堆的综错结合将是我们的 70 年代的目标。我们所致力的一些系统能够适应于这个远景并且在热核动力诞生以前能够很好地满足我们对核动力的需要。

英国原子能局工业组的某些经验*

(1947—1958)

L. 奥 汶(Owen)**

一、前 言

十二年前在李斯利(Risley)地方成立了一个负有为英国原子能局设计和建造核能生产工厂任务的小组。之后,该地即成为原子能局该组(工业组)的总部,该组在英国建立了拥有大量投资的综合性工厂。由于原子能局的工业组与研究及军备组的密切联系,后者集中在哈威尔(Harwell)和阿尔特马斯顿(Aldermaston),这方面的发展更推进了一步。虽然本文只涉及工业组的活动,但在哈威尔的研究成果曾是这个小组发展、设计及实际工作中的一个主要因素。对这个事实本人一开始便拟加以肯定。

此项工业的主要单位包括产铀厂,产钚动力反应堆,提取钚金属的设备,以及分离高度浓集及轻度浓集铀的扩散厂。这些厂的设计、建造和管理需要在许多方面有所扩展,因而资产目录中必须增加与反应堆有关的、为大量发展而设的实验所,各种不同类型的实验性反应堆以及生产燃料用的和加工用的设备。

英国电力企业利用了这个工业在进展中所取得的经验,已经能够断定最近几年内核能对电力系统可能作出的贡献。结果是,本国首批四个原子核发电站现正在顺利建设中。

按任何标准来讲,这样一个极其复杂的工业有这样的进展可说是极高度的发展。因此,值得研究一下其促成因素、所遇到的困难以及在当时情况下认为必要的那种设计机构。

二、早期遇到的困难

这个企业在战后不久创办,当时国家还处于紊乱状态中,工业设备和民用建筑物受到了重大的损失,加以这些方面的建设在战时实际上已陷于停顿,要化许多力量才能赶上。

也许更严重的是,工业必须恢复为民用,重新获取市场,回到和平时期的基础上。凡此种对现有人力和财力提出了极大的要求。也就是面对着这种严重的竞争情况,我们的新工业开始诞生。毫没有过分地讲,那时设计工程师实际上请不到,即在今天,这项人材还是缺少,要组成一支技术上合格的队伍,还是一个最大的难题;这也是决定英国计划的可能范围的一个重大因素。

如上所述,在这个时期一般的工业正在致力于恢复旧有的市场,因此新的特殊的要求

* 第二届和平利用原子能国际会议文献, A/CONF. 15/P/301, 联合王国, 1958年7月3日; 原文: 英文。

** 联合王国原子能局, 工业组。

是不受欢迎的。可是,当时有几家公司却也全心全意地和我们合作:它们对这个工业的发展作出了极大的贡献,关于这点,我们工业组表示衷心的感谢。

我们这个工业组在建立之初,是由一羣来自各方具有各种技能的人员所组成的,因此就缺乏旧工业所固有的团结一致的精神,也缺乏应有的物质保证,也缺乏足以显示过去某些问题如何着手的档案资料,缺乏那些很有价值的与其他工业的联系。尤其是,直到三或四年以前,我们工业组没有与任何国家交换过技术情报,除了加拿大,它对原子能给予极大关注。但是,英国与加拿大的目标及对眼前技术上的旨趣有很大的不同,故交换纵然圆满无缺,并不能广泛应用于当前的问题。

最后,英国大部地区地小人密。某些冒险的打算,在战争情况下、在人口稀少的地区可能被接受,但在和平时期就不可能被接受。此外,工厂基地的选择也很影响我们发展的自由。

三、组织机构的扩大

我们的最初7,8年的工作是由国防费用内拨款,并且享有国防优先权。普遍的想法总以为,一个享有物资供应优先权的机构什么问题都没有了。没有比这个再不符事实的。在这个时期里,不享有优先权的计划固然是注定失败的,可是享有优先权的计划也同样注定失败,除非这个机构具有草拟一个详细计划的能力,并且有执行那个计划的决心。

在早期,科学家们可以规定远非科技人员能力所及的宏大目标,工程师们不断地被邀去做既无材料又缺技术力量设计;显然,科学家与工程师之间的裂缝必须用一个研究和推展的机构来弥补,这个机构可以致力于物质和技术力量问题的研究和解决;当工程师有何需要的时候,它也可以提供办法。据我看来,致力于研究和推展方面以应工程设计的需要,是过去十年来本企业成功与否的一个最重要因素。

设计工程师、推展设计的科技人员和进行科学研究的科学家之间的这种密切配合,多半是各种设计在短期内执行的结果。这种配合必须继续,因为这是有效的,也因为在未来的任何时期内发展计划都不容许从容不迫地进行。某一个设计的有效时间过去视整个国防计划所规定的任务来决定,而现在则纳入英国的基本负荷的核能发电站建设计划中。今后,我们的时间尺度要从改善核能发电站的经济需要方面来加以规定。例如,有必要对作为一种必然的核动力副产品的钍加以利用并证明单位投资成本低并适宜于低负荷情况下运转的新反应堆系统是实际可行的。

在过去的三或四年中,参加到原子能方面来的私营工业大量增加,而随着核动力计划的实施,国防计划不复是本工业组的工作以及其财政支持的唯一基础。由于原子能局在咨询、发展和生产能力方面的任务相应增加了,我们感到有必要大量吸收新的干部。由于企业的性质,这种干部对原子能工业的特殊问题缺乏经验,因而他们的效用也须经过一个相当长的时期才能见效。

四、当前的地位

本工业组当前的主要目标,除了生产国防需要的原料外,还要对当前民用原子能计划提供经验和设计数据,为该项计划供应和加工处理燃料以及发展新型的反应堆。新型汽冷式反应堆,虽然适应于生产国家所需的基本负荷动力需求,但还需要进一步的发展,使

能經濟地担負巔值負荷的運轉或則应用于小的单元,例如,应用于船舶推進方面。发展的方向在于提高燃料元件的发热率和热效率,这样可使較大的单元縮小一些,成本低一些,同时使小的单元經濟价值更大。的确,目前在发展中其他大部分反应堆系統也有这些共同的目标。

在燃料生产和燃料加工的工厂里有較少数投資額大的厂。这些厂及其所服务的反应堆在加工原料的供应和质量方面,差不多是完全互相依賴的,因此小心地計劃和管理是必要的。当然,生产規模的不断扩大将是英国核动力計劃发展的必然結果。生产设备的大量扩展現已在进行中,大部分新设备将代替早期的陈旧无用的加工厂,而最重要的是,我們必須从生产規模的扩大来获得最大的經濟利益,因为燃料的制造及加工成本对核动力的成本有重大的影响。这种利益只有那些使用較先进技术的、年产量在数千吨以上的工厂才能获得。因此,在未来的一个时期里,英国的核动力計劃很可能将依靠少数大规模工序完整的(或设备完整的)工厂来完成。这么一个生产工厂如有舛誤或出岔,其影响是非常大的。因此,从技术之复杂和保証順利工作的角度来講,有理由要相应地扩大設計工作的发展内容。所以,研究与发展方面的努力与設計工程师的工作之构成一体将日益重要。过去的經驗指出,随着計劃的推展,有許多关于時間安排及組織方面的根本問題会一再发生,而为要更詳細地研究設計和发展間的相互关系,首先就必须考虑一个設計作工程的典型結構。

五、标准型反应堆的設計

計 划

我們現在認為,一个标准型反应堆的正常时序包括下列几个阶段:初步考虑設計,研究其可能性,訂出設計計劃,以及建造和委办的时期。这些过程并不是截然按時間划分的,但在可能性的研究和訂出設計計劃这两个阶段之間还有一个主要的阶段,在这个阶段,标准型反应堆停止与其对手(其它的反应堆)相竞争并保証得到財政上的核准,要得到財政上的核准,它一方面必須显示出有发展成为一种新型而經濟的动力反应堆的可能,另一方面它能尽量提出設計和发展方向的問題,使建造这种反应堆成为必要。

在标准型反应堆得到財政上的核准后,就可不必致力于两个或三个相互竞争的反应堆系統,而可以集中全力在这一个选定的反应堆的設計上。磋商設計时主持設計的設計工程师必須与研究、推展、材料供应及建造方面的代表商定一个完成日期以及一个使协调研究、推展、設計和建造等方面工作的控制計劃,特别是有关設計的主要决定及資用的物理数据,其提出日期必須商定。商定的日期不但是設計办公室一切活动的根据,而且是推进反应堆的研究和发展工作、燃料元件以及現有加工设备管理調配工作的根据。設計計劃和研究及发展計劃的构想全仗有經驗的判断,这也是能否成功的關鍵。

設 計 的 目 标

概括地說,主持設計工程者的目标在于制造一个反应堆,投資有限而能提供足以設計出一种安全的、技术上完备的和經濟的民用动力单元的資料。在标准型反应堆本身,安全問題是主要的,同时,一个标准型反应堆(它通常是中等規模和产量的),必須能保証提供一些較大的民用单元(反应堆)所会遇到的一切技術問題。在運轉和管理方面的节

約并不重要,因为建造标准型反应堆的目标是为最合宜的民用核动力站的设计提供资料。假如节省了标准型反应堆的开支,结果却延迟了资料的获得,那么这个不大的节省为以后动力计划整个开支的增加所抵消。

因此,主持设计者要开始设计出一个反应堆,其结构成分和燃料的强度及使用年限必须要能与可能的低投资成本和燃料节约相平衡。通常从一个强烈的经济动机出发,就会这样设计反应堆芯部的组成部分,使其在使用年限上接近于安全限度。同时,燃料元件的发热率以及运转时的温度和通量比较过去的经验都有所增加,所以,安全的考虑要是不引向过分设计而致浪费的话,那么就必须在发展设计方面努力,以补充经验的不足。

人 员 配 备

假定整个机构从事于一些标准型反应堆的阶段设计和建造以及反应堆实验工作,则合理的计划需要下列工程技术人员:

人 员	反应堆 总设计处	燃料元件 生产设计处	电工和 仪表	检查,供应 和订约	土木,机械 和结构	建筑和其他
高级人员	6	3	3	2	4	4
其他专业人员	70	25	30	25	50	50

总 数: 高级专业人员 22 人,其他专业人员 250 人

半数以上的人员要有“专业”资格、大学学位、工程学会的正式会员或国家颁发的高一级的证书。

这样的人员分配是合乎一个包括标准型反应堆及其燃料生产和加工厂在内的设计工程的需要,除了一切建筑和制作工程是按合同承包完成的之外。上列数字是根据三年半左右的执行情况而得出的平均数字。当然,实际上,对个别类型的人员的需要有时会达到最高额,但是还可以适当地安排其他设计工程来调配一下。

交由主持设计者调用的研究和推展工作的人力多少是按照对问题性质的预期而定。可是,在某种特殊情况下,它可能包括五名高级人员及一百名其他人员,其中大部分成员要是具有专业资格或学位的。当然,这些人员还间接地得到一些从事基础工作或普通设计工作的研究人员的帮助,因而整个直接和间接的设计工程人力可能有以上数字的两倍。

在研究某个设计的可能性的阶段里,足够的人力可以从事研究和推展工作,以保证主要技术问题得以明确。在设计被核准后的几个月里,整个发展工作集中地推进着,将继续大约 18 个月之久,在此后两年里,那时反应堆在建造中,担任推展工作的人员就被调派到其他设计工程上去,原来工程所需人力将降至最高额的差不多四分之一。

关于担任推展工作的人员的调配,更详细的分析只能结合某一个别的设计来进行。试以正在进行中而需要新的金属容器材料的先进气冷反应堆为例,所需人员的典型平均数,不包括高级人员在内,有如下表:

	反应堆 物理学	工程,热传输、 气体动力学	适合性 和化学	燃料元件 发展	机动人员
第一年	5	20	25	45	5
第二年	5	25	12	35	20
第三年	5	10	5	15	20

保留一些后备力量以备在第二、三年内专门研究一些难以处理的问题亦属必要。还有一种特有的情况是,当某一新的燃料元件需进行研究时,大约有一半人力须专用于燃

料的发展工作。当反应堆投入生产后,这样的人力就可以逐步縮減,因那时标准型反应堆本身成为一个发展燃料的工具。

推 展 工 作

从事推展工作組的领导者其主要职责在于工作时间的安排上。反应堆结构材料的核特性要求改进新的金属或合金的制造技术。也必须以一个同样月数的发展阶段所获得的证据来保证材料在中子辐照情形下能维持其性能达廿年之久。用外推法(extrapolation)是必然的,而透彻地理解所观察现象的机制较之简单的靠经验的观察总来得高明。为要使推展工作所需要的条件重现,就必须那种装备有试验环路(test loops)的高通量研究反应堆(high flux research reactors)。我们必须对长期缺乏高通量试验设备的问题加以重视。这种设备的配置本身就須占用現有的一部分科技人力和标准型反应堆的发展成本。

时间安排上的困难再沒有比改进和试验燃料元件及其制造方法更显著的了。即使有关燃料的不活性成分——外壳及支持物——的生产冶金术已经确定,也沒有理由給少于两年半的时间来完成从初步审定燃料的规格到第一个反应堆投入生产的全部过程。在这个时期里,有必要研究生产技术、建立一个标准型生产系統,并且生产足够多的燃料以便任何有关技术方式变动的利与弊的結論都有确实的统计根据。燃料标本的热能传输及其结构的特点必須加以校核,有极小部分的燃料元件必須在高通量反应堆中經受迴路試驗。

专用于一种反应堆的燃料元件其最好的测量标准是它在这种反应堆中的性能。从一大堆代表正常生产原料的燃料标本应可得到关于它的性能的数据,这在经济方面亦很重要。只有用标准型反应堆作为它的燃料的试验台(test-bed)才能做到这点。从这个意义来讲,反应堆是从事研究与推展工作的組合的一个发展设备而已。除了它的主要燃料充量之外,反应堆还可以用来检验燃料元件在设计上的种种修正,因为这些修正是为了把这种燃料的冷却迴路加进去而设计的。选择标准型反应堆的燃料定格(fuel rating)較高于預期的民用反应堆的燃料定格,是比较有利的;这样,在检验燃料或结构成分里的辐射灵敏效应方面,标准型反应堆总是能够走在民用反应堆的前头的。领导设计者的責任是保证标准型反应堆提供这方面的資料,同时不妨碍它的另一个主要职能,那就是強烈的反应情况可靠而又经济。

虽然到此为止我所提到的是标准型反应堆的设计和發展計劃,但标准型反应堆的建造設想未尝不可有效地适用于介绍新型的处理。假使这样,设计方面的不确定性一般比較少,可是由于組成一个燃料循环的处理过程間的相互依賴,主要生产单位如有耽誤或出岔,影响就比較大。在好多情况下,由于經營管理的关系,一个新的生产单位要包括少数平行的工厂系統。标准型系統或其組成部分估計将来能成为生产系統中的一个主要单位。这个单位的发展过程可能要經過先驅工厂的經營管理这么一个中間阶段。在其發展中,研究和設計的結合是必需的。

推展計劃中的一些問題

燃料設計的成功与否要靠負責整套設計和建造計劃的高級人員的協調一致,这就必

須看这些計劃是否都能執行。差不多在所有的情况下，設計工程師必須根据不完全的研究資料来作出許多重要的決定，主要靠判斷力来估定某一部分的調查工作是否已經到了可以假定其在設計方面最后能成功的地步，同时有足够的时间容許供应和建筑部分尽其职能。在許多情况下，适当地採納这种意見将有助于設計的順利推展，这应当归功于有关的研究和設計工程師。这一点不多讲了，可是我想在这里举三个实例来重新考虑一下問題，在这些实例中，計劃的推展阶段发生了問題，以至于必須重新考虑設計原理的主要款項。

考尔特(Calder)反应堆引燃裝置(Cartridge)上金屬容器(Can)的發展过程(試制过程)

考尔特反应堆上的可行研究工作是在哈威尔(Harwell)地方进行的，它包括充分的实验工作，目的在建議採用鎂合金作为制造金屬容器的材料，引燃裝置大約須四尺长；同时也提供了这种合金的发展工作性質。

当考尔特反应堆工程计划在1953年初被核准的时候，工业組接办了这樁工作，他們的第一件事是对設計的可能性进行研究，并且拟出一个計劃。这个計劃包括許多項发展工作，这些工作必須限期完成，以便工程師們得到必需的資料来配合整个計劃进行原料和設備的訂貨。

有关引燃裝置上金屬容器的試制过程的主要日期：

1953年5月 設計委員會举行一系列月会的第一次會議。参加这次會議的包括研究、推展和設計人員。他們討論了发展(試制)的一些問題，并且商定了解决这些問題所需的时间。

1954年1月 在这个日期，引燃裝置的长、闊、高度应确定下来，原料和制造方法也应概括地商定下来。这是必要的，因为这样可以託設計工程師們布置引燃裝置的制造車間并且对远期交貨的車間設備进行訂貨。

1954年4月 在这个日期必需簽訂金屬容器的訂貨单，使承制厂有时间改进技术并且容許研究小組在授权着手生产前完成标准金屬容器制造的研究工作。

1954年9月 在这个日期引燃裝置的一切細節必須最后固定下来。

1955年6月 在这个日期引燃裝置制造車間必須布置完竣，管理人員接收車間，开始学习技术，改进技术。

1956年3月 在这个日期第一套裝填物必須完成、試驗过并且检查过，准备裝入反应堆。

1956年6—7月 鈾堆达临界。

必須着重指出，这些日期是在1953年春季訂定的，而反应堆的設計和制造的計劃是按照这些日期安排的，計劃里的任何部分不容放松一点儿，例如若實驗室不能按預定日期對設計工程師提供所需的資料，整个工程就会受到严重損害。

这个計劃給冶金專家們9个月的时间来断定合金的組成及制造金屬容器和裝配引燃裝置的大致方法；他們然后再有9个月时间来改进細節。最糟的問題是原来用以制金屬容器的材料质量的不稳定以及它的較差的延性和在低温度时应变下的易于破裂。此外，恐怕在顆粒边界綫在低的应变率情况下形成的孔眼能联結起来成为一条漏道(leak path)。在低温度下，Mgnox的柔軟性也会使鈾的表面起皺，产生延长的可是低的应变率，結果发生慢性的应变(slow strains)。

这种問題确是难以解决的。1955年1月設計瀕于危殆，万一我們主要的发展方