

内部资料
注意保存

*
*
* 电力考察团关于核电部分的考察报告 *
*
*

中国电力考察团核电小组
一九七三年五月

电力考察团关于核电部分的考察报告

关于核电部分，这次考察的目的在于了解日、加、意、西德、瑞士五国核电站设备制造水平和运行情况及引入国外设备和技术的可能性。根据五个国家的情况，考察对象侧重在技术上比较成熟，并有可能引入的重水堆和轻水堆两种堆型。在五个国家共参观了57个单位，其中工厂28个，研究单位12个，核电站12个，设计公司3个(见表一、二)。

这次考察是在国内外一片大好形势下进行的。国内工作是根据地。在国内粉碎了林彪反党集团，巩固了无产阶级专政和文化大革命的成果，国民经济持续发展，出现了大好形势。我对外工作，在毛主席革命外交路线的指引下，也取得了很大成绩，我国的国际地位空前提高。因此，我们所到之处，都受到热情友好的接待。

作为电力工业的一部分内容，出国考察核电，这是第一次。考察之初，我们就表示，我国将自力更生地发展核电，同时，也不排除引入技术和设备的可能性。各国的反应有所不同，总的讲，是重视的。

西德的态度比较积极主动。西门子和德通用电气两家公司都直接表明愿向我提供成套核电站设备，并承担总包。该两公司每年各能承包一套至一套半核电站设备。德通用电气公司的研究设计力量，每年可做两个反应堆的设计。西德核电站设备制造能力已超出国内核电发

展的需要，急需向国外推销。但目前定货不多。一九七二年，西门子公司没有接到定货。一九七三年初接到一个国外定货。德通用电气公司于一九七二年仅接受了一个国内电站的定货。因此，西德两家公司对我拟发展核电非常感兴趣。

从机械制造能力来看，日本的东芝、日立、三菱三家公司每年各能生产核电站设备2~3套，并能在日本国内承担总包。但是，设计和技术上都是照美国的，某些主要设备如主循环泵，再循环泵仍需从美国进口。同时，日本国内成套制造的核电站尚缺乏运行经验。这次几家公司虽然给我们看了他们核电站设备制造能力，但估计由于以上原因，未正面向我表示可以提供核电站。日立公司建议我们派一批人到他们所承包的核电站实习核电站的建设工作，或派少数人参加他们将要举办的核工程技术人员训练班。

加拿大向巴基斯坦和印度出口过重水堆电站，并有一定的设备制造和运行的经验。估计可能是由于重水生产尚存在较大问题，这次没有表示愿向我出口重水堆。但是，加拿大矿产、资源、动力部正式提出，希望我们于今年夏季或秋季再派一个小组对核电进行深入的考察。

瑞士不制造反应堆成套设备，只有两家工厂制造轻水堆的压力壳和换料机，但有几家顾问公司表明愿为我进口核电站承担技术谘询工作。

意大利尚无成套经验，但出口单项设备如压力壳、堆内部件。布雷达公司制造压力壳较有经验，表示愿向我出口压力壳或承包压力壳工厂的设计和建设。其电力部门详细介绍了他们几个核电站的运行经验，态度是诚恳的。

在考察期间，美国的有关公司多方寻找机会与我方接触。在瑞士，经请示我大使馆，会见了美西屋公司在比利时的子公司——文尼西公司（WENESSE，即西屋欧洲动力系统）的代表。他们要求会见的目的，主要是为了表明西屋公司有向我出口核电站反应堆的愿望。

一、各国核电发展概况

这五个国家都是从一九五五年第一次日内瓦“和平利用原子能会议”后开始发展核电的，至今投入运行的电站反应堆各有三至五座（见附表三）。除意大利仅有三座十几万至廿万瓩的模式电站，总功率为58万瓩外，其他四国已运行的核电总容量达100万至200余万瓩。目前，各国核电在电力工业中所占的装机容量的比重并不甚大，瑞士约占10%，其它国家均为2%至4%左右（见附表四）。但今后将有较大的发展（见附表五）。尤其是西德和日本。西德于五年内平均每年将建成反应堆两座，至一九七七年，总功率将达1135万瓩，于一九八三年将达3000万瓩。日本于五年内平均每年将建成反应堆三座，至一九七七年，总功率将达1500万瓩，于一九八〇年达3370万瓩，于一九八五年达6000万瓩。由于电能需要的

不断增长，可利用的水力资源越来越少，煤和石油大部分依靠进口，核电的发电成本由于单堆容量增大，已低于或接近火电，因此，各国都认为，建设核电站是今后电源开发的主要途径之一，对发展核电的态度是积极的。除意大利利用较长的时间，等待三个模式电站的运行经验，以便选定发展方向外，其它国家都较早地有近期的和远期的发展规划。除了按照选定的堆型，建设当前的一批商业核电站外，各国都对先进的堆型开展不同程度的研究发展工作。发展快中子增殖堆被公认为核电发展的远期目标，除加拿大瑞士外，各国都在进行研究。瑞士认为国家小，财力有限，只能发展几项专长的技术，不宜全面建立自己的核工业。其他国家，为了适应核电发展的需要，都不同程度地建立了自己的核机械制造工业体系。尤其是西德和日本的规模很大，其生产能力将超出本国建设的需要，势必将向国际市场扩张。

4. 轻水堆

所到五个国家中，加拿大专门发展重水堆。其它四个国家都发展轻水堆。在已运行的16座反应堆中（十万瓦以下的试验核电站不计在内），轻水堆占14座，其中压水堆7座，沸水堆7座。意大利早期建了三个示范电站，但长期持观望态度，在堆型选择上，也倾向于轻水堆，但至今尚未完全下定决心。西德、瑞士、日本已走定轻水堆的路子。至一九七七年末，日本的22座热中子反应堆中，轻水堆为20座，其中，压水堆、沸水堆各10座。西德的15座热中子反应

堆中，有13座轻水堆，其中，压水堆6座，沸水堆7座。日本和西德的情况，大体上反应了国际上发展的总趋势。从整个西方世界（不包括苏联及东欧国家）来看，至一九七二年底，运行、建造和计划中的核电站共约两亿一千万瓦，其中，轻水堆为一亿八千余万瓦，占85%。其它堆型包括气冷堆、重水堆、高温气冷堆和快堆约三千万瓦，占15%。而轻水堆中，压水堆一亿一千万瓦（占总数的53%），沸水堆六千七百余万瓦（占总数的32%）。从以上统计数字看，轻水堆在国际市场上，已具有压倒优势。

日本和西德均以引入美国设计和专利为起点，发展轻水堆技术，并且在轻水堆已经得到商业推广的情况下，正大规模地部署自己的核电工业体系，力图早日摆脱对美国技术的依赖。日本的日立、东芝和西德的通用电气公司沿用与美国通用电气公司技术专利和合同，发展了沸水堆。而日本的三菱与西德的西门子公司则沿用与美西屋公司的技术专利合同，发展了压水堆。美国发展轻水堆从研究发展工作开始，经历了试验电站和模式电站阶段一直到正式在商业上应用，大约十五年的过程。而西德于一九六二年建成瓦克试验电站并引入美国通用电气公司的设计，开始造贡德瑞明根模式电站，很快就提高到能够独立设计和制造轻水堆设备，并且在美国设计的基础上有所发展，至今十年时间，在技术上已接近美国的水平。日本从开始建造从美国引入的敦贺电站到现在七年时间，不仅已经拥有一批运行的核电站，而且，

能够按照美国的设计制造成套核电站设备。日本各家公司，都是自成系统地组织了一批专业化工厂，成套生产轻水堆电站设备。而西德几家公司重点在承担总包和设计，自己只生产部分设备，其他多数设备项目则委任本国或欧洲范围内其他厂家承制。日本和西德各家公司都和美国公司合资建立了元件制造厂。目前各公司都已能提供压力壳、蒸汽发生器、堆芯及控制系统等压水堆或沸水堆的主要部件。日本三家公司的生产能力每年约为700~800万千瓦，西德两家约为200~300万千瓦。

水堆优势的形成是有它的历史背景的。美国于四十年代末期就开始研究压水堆用于核潜艇。一九五三年建成陆上模式堆，一九五四年下水。在取得一定运行经验后，压水堆的技术很快在核电站上得到了应用，一九五七年建造第一个压水堆模式电站希平港，后又相继在美国建造了德累斯顿一号，杨基等沸水堆和压水堆模式电站。六十年代前半期，美国西屋和通用电气两家公司在西德、法、意、比、荷、印度和日本等国建造了轻水堆试验电站和模式电站共11座。美国通过在国内和国外的这批电站，取得大量经验，进行了商业电站的研究设计，与此同时，开放轻水堆的技术专利和低浓铀市场，以雄厚的资本和技术力量将轻水堆推入西欧市场和日本。在这以前，欧洲一些国家为了在核燃料上独立自主，有以天然铀为燃料发展核电的计划。英、法已走上天然铀石墨气冷堆的道路，但由于它造价较高，施工周期较

长，经济性较差，这种堆型已难与水堆相竞争。法国一九六九年决定改为发展轻水堆，英国经过了几年徘徊之后，也有转向压水堆的趋势。日本和意大利的第一个核电站虽都是从英国引入的石墨气冷堆，但他们都明确地表示，肯定不会再走这条路子。欧洲其它国家如瑞典、西德和瑞士在未能取得浓铀时，亦曾有独立发展天然铀重水堆的计划，并建造了试验电站。但未待技术上成熟，美国的轻水堆随同浓缩铀一起进入欧洲市场。在这种情况下，要继续扶持重水堆发展下去，一直到商业上应用，还需要相当长的时间和大量的资金，因此，都相继放弃重水堆，改由美国引入轻水堆。

轻水堆占有优势，除了上述历史情况和美国输出和垄断策略的因素外，它在技术上比较成熟，经济性较佳也是很重要的原因。由于系统比较简单，占地面积较小，施工周期较短，现场工作量少，因此造价比较便宜。轻水堆目前正向大功率发展，单堆功率从20~30万千瓦已增大到120至130万千瓦。按照西德动力设备联合公司的看法，根据现有反应堆控制和测量技术和设备制造的工艺水平，轻水堆的单堆功率提高到200万千瓦是有可能的。这意味着轻水堆还有潜在的经济性。此外，在后期轻水堆的设计中采用了束棒控制、加可燃毒物铀元件，堆内中子探测装置、电子计算机控制、放射性废气活性炭过滤、反应堆部件的在役检查等技术，改善了核电站的经济性和安全性。在反应堆设备加工工艺方面，也有新的发展，如蒸发器管板钻孔使用数

字控制镗床，大尺寸的压力壳，解决了现场拼焊及热处理技术问题。这一系列技术上的改进，促进了轻水堆的推广。

另一方面，轻水堆也还存在着一些技术问题。例如，沸水堆采用直接循环后，汽轮机的放射性积累尚无长时间的测量数据，对其检修的困难情况，存在着不同看法。压水堆蒸汽发生器时而发生因镍管管子因腐蚀或磨损而破漏的事故，严重时，需更换整个蒸发器。西德设计改用因科铬依，但尚无运行经验。美国最近发现压水堆的未予加压元件包壳受水压而挤伤的现象（或称为失稳），因而决定使用同类型元件的一批电站降低功率运行。另外关于堆芯事故冷却问题，一九七一年在美国进行的一个堆芯事故冷却模型试验未能给出预期的结果，因而，引起了极大的争论。

总之，轻水堆的技术，至今为止基本上还是为美国所控制，除西德西门子公司已结束了与美西屋公司的专利合同外，其它各家仍都使用美国的专利。法国最近准备发展压水堆，组成新法兰西原子公司，美国西屋公司有45%的股份。英国通用电气公司如决定搞压水堆，也将使用西屋公司的设计并采用部分国外设备。西德和日本的元件制造厂都有美国股分40%至45%。至于轻水堆所用的低浓铀，则更是美国原子能委员会独家垄断。欧洲各国力图联合建立铀同位素分离工厂，以打破美国对低浓铀的控制，但意见分歧，且技术上困难较多，因此，进度迟缓，短期内尚不能摆脱对美国的依赖。

2 重水堆

重水堆做为核电站反应堆，其最大优点是可以使用天然铀，而且燃料循环经济，如果铀元件的燃耗可以达到加拿大的设计指标 9300 兆瓦日/吨铀，则卸料中铀 235 的浓度可低到 0.3% 以下，即接近于铀同位素分离工厂的尾料，这样，就无需回收使用。另外使用同样数量的天然铀，重水堆的发电量比轻水堆要多。因此，许多国家如加拿大、瑞士、西德、瑞典在无法取得浓缩铀的条件下，开始都考虑过重水堆。

前面已经讲到，欧洲几个国家的重水堆计划由于受到轻水堆和低浓铀的冲击而被放弃。瑞士不仅放弃了重水堆计划，而且否定了独立研究发展的政策，改为从外国进口核电站，瑞典甚至中途停止了一座技术上不成熟的马维肯重水堆电站的建设。西德虽然后来又建造了气冷重水堆，并向阿根廷出口了一个三十万瓦的重水堆电站，但他明确地表示，西德国内将不会再发展重水堆。

加拿大是唯一的国家坚持了重水堆的方向。加拿大原子能公司和矿产、资源、动力部人员都认为，对加拿大来讲，这一方向是正确的，今后也不打算改变。他们认为加拿大 2200 万人口，国力有限，不宜搞多堆型，不宜建立昂贵的低浓铀燃料循环体系，于是认定天然铀用于重水堆，核燃料独立自主，转换比高，燃料深，燃料循环经济等优点，并且结合了铀资源较为丰富（约占全世界的 20%）的有利条

件，在发展核电之初，即确定了“一心一意”发展重水堆的方针。并且逐步建立了价值三亿多加元的核工业体系。其中，三亿元投资用于总年产量为1600吨的三个重水厂（后来重水厂建设遇到问题，资金有所追加）。近几年来，加拿大在重水堆设备方面所做的一些改进，在皮克灵电站的运行中得到了证实。例如重水漏损量，在模式堆道格斯点上为每小时四公斤，而在皮克灵上，减少到一公斤。皮克灵电站四个堆共用了10台装卸料机，由于运行情况良好，效率可以提高，准备在布鲁斯电站（四个堆）上减少到4~6台。铀元件的燃耗也在逐步提高。加拿大原子能公司认为，皮克灵的运行情况是满意的，因此，对重水堆的发展方向更增加了信心。目前正在研究轻水冷却和有机冷却两种新型重水堆，以改进重水堆的经济性。但是，重水堆发展的比较慢。一直到一九七一年皮克灵电站投入运行以后，才算在技术上比较成熟。所到欧洲各国也公认：重水堆电站不仅从概念上具有使用天然铀，燃料循环经济的优点，而且在工程上也可以做到相对的安全可靠、运行正常。唯其经济性如何，国外多数人仍持有疑议，另外，皮克灵电站仅有3~4个堆年的运行经验，通过长期运行，不能排除出现一些新的问题。

加拿大在重水堆方面面临的一个最大的问题是，重水生产不足。加拿大有三个重水厂，总产量为1600吨/年，但由于存在着技术问题，投产时间一再推迟，目前只有霍凯斯堡一个厂经过改建重新投

入生产，尚未达到年产四百吨的设计产量。另外一个年产四百吨的格雷斯贝重水厂还在改建中，预计一九七四至一九七五年才能重新投产。年产八百吨的布鲁斯重水厂正在进行调整。所以，加拿大重水生产远不能满足本国的需要，正在国际市场上陆续购买一千多吨重水。如果上述三个厂可以调整到比较稳定地进行生产，预计于一九七四年或能自给。

二、各国发展核电的特点

1. 重视反应堆部件的研究发展工作

西德和日本虽使用美国专利制造核电站设备，但都有相当规模的研究和设计部门独立开展反应堆设备和部件的试验研究工作。以西德为例，西门子公司的爱尔兰根研究中心的核反应堆的研究部分有800人。下设热工、水力、机械、材料、元件等七个实验室。德通用电气公司格罗斯维尔兹汉姆研究中心，有反应堆研究设计人员600人，八个热工水力台架，九个热室，其元件试验室可以进行铀钚元件的试生产。

各制造部门的研究单位所进行的试验研究工作具有与设计、制造、运行紧密结合的特点。其试验项目的目的有以下几个方面“(一)改进反应堆的性能；(二)反应堆部件和设备的研究，通过计算分析和反复试验定型设计图纸；(三)产品出厂检验；(四)材料性能和加工工艺的研究。

反应堆的改进，重点之一是不断完善元件的设计，有的公司如西

德西门子公司为了独立设计反应堆，在元件研究上狠下功夫，不仅在台架上进行元件的热工、水力、机械振动、腐蚀等试验，而且多途径地进行元件的堆内考验。在大量试验工作的基础上，西门子公司设计的压水堆元件与美西屋公司的设计有一定差别，至今尚未遇到美国压水堆未予加压元件水压挤伤问题。其它例如：沸水堆压力壳内的主要部件如汽水分离器、干燥器、喷射泵或轴流泵也都需在专门台架上进行试验。控制棒传动机构要求上万次的动作试验。日本富士电机为了设计和制造普贤号重水慢化轻水冷却型反应堆的装卸料机，建立了高24·5米的台架，包括建造和试验需二年时间（试验需进行半年）。西德的卡爱斯贝水泵厂正在建造两千平米、高12米的试验车间，专门为大流量主循环泵进行热态试验用，回路最大流量为每小时6万吨，投资为2000万马克以上。日本就是因为没有类似的试验设施，主循环泵和再循环泵这两项设备不得不由美国进口。开展反应堆的研究设计，需要进行大量的计算和分析，各公司都有自己的计算中心，计算力量和设备，都比较强，例如，日本的日立制作所就有6台电子计算机，其中100万次的有两台。

从反应堆试验研究工作的内容来看，大体上可以看出各国的技术水平。西德所进行的研究项目大多是改进美国设计的部分。而日本多为重复美国的试验或属于产品检验性质的项目。由于研究工作的基础较好，西德已经能够独立设计，而日本目前只能使用美国设计。但日

本在积极扩大他的研究单位的规模，用意在于尽早摆脱美国的专利。

当轻水堆在技术上已经成熟可以推广于商用的情况下，它的研究发展工作已不再由国家研究机构承担，而是转移到制造厂商，成为改进产品，以争夺市场的手段。因此，各大厂商对此非常重视。日本和西德最为突出。加拿大的作法略有不同，他把研究发展工作和设计都集中在国营的原子能公司内进行，制造厂只进行某些单项设备的试验研究。加拿大原子能公司共4600余人，分布在两个研究中心和一个设计中心。巧克河研究中心有2380人，在反应堆方面有几个试验堆进行反应堆理论和工艺研究。怀特谢尔中心，共791人，主要研究有机冷却重水堆。西林顿公园是一个研究设计单位，有868人，主要负责反应堆设计和工程性的试验研究工作。

2. 先进堆型的研究

各国除选用较为成熟的堆型建设商业性核电站外，都在研究一定先进堆型，探索核电下一步发展方向。各国一致认为快中子增殖堆是有效利用核燃料的最佳途径。除加拿大、瑞士外，日、意、西德正在积极开展钠技术的研究，并已开始建造试验快堆和模式快堆。在先进型热中子转换堆方面，日、加、意、西德四个国家都有明确的研究发展计划。西德正在建造的气冷重水堆和高温气冷堆模式电站各一个，但是重点放在高温气冷堆上。日、加、意则着重研究重水慢化、轻水冷却堆。加拿大的金特利电站（重水慢化、轻水冷却型）已投入运行。

同时还开始研究比功率更高的重水慢化、有机冷却型堆，据称，八十年代末，上述两种堆型或可达到应用阶段。日本研究重水慢化、轻水冷却堆的目的在于采用钚自持燃料循环，以备在快堆不能很快应用时，使钚可以得到及时的利用，以减少低浓铀的需要量。各国对上述研究工作，都由国家投入相当数量的资金。除政府的科研机构做为重点单位，系统地开展研究外，各制造厂家也都在政府的支持下，配合进行设计和部件的研究。

反应堆技术的发展，不同于常规发电设备。不同的堆型虽在技术上有互相借用之处，但由于在工艺流程上有较大的区别，每一种新的堆型都需要经历试验堆、模式堆和工业规模的示范堆几个阶段，才能达到推广。例如，轻水堆与重水堆目前在技术上已比较成熟，但快中子增殖堆仍处于试验堆和模式堆之间。资本主义国家，为了在国际市场上竞争，他们在技术上的发展，采取了引入和独创并用的方针。对已成熟的技术，赶快买进，以求跟上世界水平，否则产品就会被淘汰。对新堆型、新技术则一方面积极研究，争取在技术上领先，另一方面，则千方百计地把别人的经验抓到手，以加快自己研究发展工作的速度。例如：西德在高温气冷堆方面，虽集中力量推进自己独创的“砾石层”设计研究计划，但同时从美国海湾原子公司引入棱柱型的设计，进行比较。日本也以五十万美元的代价购买了加拿大的专利做为设计普贤号重水慢化、轻水冷却堆的参考。英国政府最近决定批给温费理斯研

究中心600万英镑，用于重水慢化、轻水沸腾堆的研究，并准备以温费理斯模式堆的经验交换加拿大金特利堆的技术专利。加拿大由于资金不足，技术力量单薄，则希望通过与英国合作，并争取法国参加，使重水慢化、轻水冷却堆型尽快成熟，以便与美国的轻水堆竞争。

3. 注意节省投资，讲求经济效益

我们在国外看到不少设备简陋，讲求实效的实验室和车间。如加拿大维克斯公司反应堆主体结构组装车间，仅约1200平米，与一般焊接车间一样，没有过滤通风。当屏蔽结构焊接完毕，准备组装堆芯部件时，将组装台周围清扫干净，然后搭起密封的塑料布棚，即可进行装配重水罐、锆管等有高度清洁度要求的工作。车间里只有60吨的吊车，反应堆主体结构总重750吨，组装后，用千斤顶将支座架起，装上轮子沿着轨道拖出车间，即可装船。

又如西德拔栢葛公司生产压水堆大型蒸汽发生器的清洁车间是一个塑料帐篷。帐篷是用内部充气造成25毫米内压，使呈半园形，没有支承骨架。内部面积约为50×25米，高约15米。可以在里面同时组装四台蒸汽发生器。为了利用水路运输，该帐篷设在一个垃圾焚烧厂旁边。但由于帐篷的密封性较好，也能保证组装时的清洁度。帐篷还可以设在现场，蒸发器就地进行组装，可以免除整体运输的困难。

从所到各核电站情况看，占地面积不大，建设期间的施工队伍和

投产后的运行人员都不算多。例如，瑞士的贝兹诺电站有两座反应堆，四台汽轮发电机组，总功率为70万千瓦，全厂占地面积约27万平米（约400亩），厂房基础面积约2万平米（约30亩），全厂职工人数约200人。日本高滨电站两堆两机，总功率150万千瓦，全厂占地20万平米（约300亩），施工期间高峰人数为2700人，预计建成后，运行人员为120人。西德的卑布利斯电站两堆两机，总功率250万千瓦，全厂占地35-40万平米（525亩至600亩），施工期间高峰人数为1500~1700人。

占地面积不大的原因有几方面：（一）有些国家，国土小，政府对土地的使用加以控制，特别是在城市或游览区附近，施工现场在完工后，都要恢复其自然面貌；（二）设计上尽量布置得合理紧凑，以缩小收购土地面积，降低造价和发电成本；（三）在放射性剂量安全上采取措施，使能在电站较近的距离内允许居住，如瑞士米勒堡电站，在距电站主厂房500米处即有居民住宅。

减少施工人员在施工组织。第一，主要设备的安装均由制造厂派人，分批分期进入现场；第二，施工队伍，根据施工程序随时调剂，例如卑布利斯反应堆建筑的施工，土建工人在做好基础后即撤离现场，待球形钢结构大部分完成后，再回到现场，施工内部混凝土结构。有的电站计划建两个或几个反应堆，开工时间相错一年至两年，采取了流水作业的施工，有利于调剂力量，减少现场总人数。