

出 国 考 察 报 告

法国压水堆核电站技术

中国原子能电站技术考察团

(内部资料)

水利电力部科学技术情报所

一九七八年八月

目 录

一、法国压水堆核电站的发电情况及今后趋向	(1)
(一) 法国核电站建设概况	(1)
(二) 法国压水堆的特点	(4)
(三) 法国为压水堆开办的研究试验工作	(6)
(附录1-1) 法美原子公司研究计划	(7)
二、压水堆核电站的厂址选择	(7)
(一) 法国压水堆核电站厂址规划	(7)
(二) 厂址选择考虑因素	(8)
(三) 选厂工作	(11)
三、运行与施工中的压水堆核电站	(13)
(一) 费森汉姆核电站	(13)
(二) 格拉芙利纳核电站	(16)
(附录3-1) 比利时蒂昂日核电站概况介绍	(17)
四、压水堆主要设备的制造	(19)
(一) 压力壳	(19)
(二) 堆内构件	(22)
(三) 燃料元件	(23)
(四) 主泵机组及控制棒驱动机构	(26)
(五) 蒸汽发生器	(30)
(六) 堆内监测系统	(34)
五、三废处理	(38)
(一) 废水处理	(38)
(二) 废气处理	(40)
(三) 固体废物处理	(41)
(四) 排放标准	(41)
六、法国对压水堆安全的科学研究工作	(43)
(一) 概述	(43)
(二) 燃料元件	(45)
(三) 堆内构件及压力壳	(49)
(四) 失水事故	(50)
(五) 蒸汽发生器	(54)
(附录6-1) 关于压水堆安全的一般情况	(56)

(附录6-2) 法国对压水堆安全的考虑及有关规定	(57)
(附录6-3) 法国对核电站安全的管理机构和审批程序	(59)
七、二回路及汽轮发电机组	(63)
(一) 热平衡图	(63)
(二) 热力系统	(63)
(三) 主要设备	(66)
(四) 运行	(68)
(五) 汽轮机起动	(70)
(六) 制造厂	(73)
八、法国中小型压水堆动力装置	(73)
九、特里卡斯丁(Tricastin)核电站主要技术特性(附录一)	(75)
(一) 概述	(75)
(二) 核岛	(77)
(三) 常规岛	(84)
(四) 建筑和结构	(85)
(五) 技术数据	(85)
十、燃料组件概况(附录二)	(91)
(一) 燃料组件概述	(91)
(二) 燃料棒和燃料组件的零件	(91)
(三) 设计准则	(93)
(四) 燃料运行限制	(95)
(五) 技术数据	(95)
(六) 制造	(97)
十一、原子能电站技术考文团在法国考文的有关单位的基本概况(附录三)	(101)

一、法国压水堆核电站的发展情况及今后趋向

(一) 法国核电站建设概况

二次世界大战后三十多年来，法国电力建设基本上可分为三个时期：（1）在战后初期，为了充分利用本国的水力资源，大力开发水电，同时在缺乏水力的北方工业地区建设了一定数量的火电厂；（2）在五十年代后期至六十年代末，国际石油价格低廉，同时由于可供经济开发的水电，大部分已经利用，因而法国加快了火电厂的建设，以燃用进口石油为主；（3）从1970年起，法国决定加快建设核电站，特别是在1973年中东石油危机后，鉴于依靠进口石油对国民经济影响的严重性，同时由于石油价格上涨，核电发电成本已可与常规火电厂的发电成本相比，在1974年决定大批建设压水堆核电站，按其规划，到1985年压水堆核电站装机容量将达到4000万千瓦，法国核电将从目前世界第六位跃居为第二位，仅次于美国。

法国有比较丰富的水力资源，但燃料资源十分缺乏，石油、天然气和煤炭大部分都要依靠进口，因此法国很重视水力资源的开发利用。目前水电装机容量已达到1860万千瓦，水电年发电量达到600亿度。他们主要是依靠建设梯级径流水电站，多级开发重复利用水能，以增加水电的发电量，目前全国水力资源已开发利用了95%。

六十年代法国核电站尚在探索和试验阶段，能经济开发的水电已不多，而电力负荷上涨又较快。因此法国在这一时期建设了大批火电厂。从1955年起陆续建设单机容量12.5万千瓦的火电机组38套；从1961年起建设单机容量25万千瓦的火电机组37套；从1968年起建设60万千瓦单机容量的火电机组7套，正在建设70万千瓦的4套。到1977年末，法国火电装机容量已达到2910万千瓦。由于不断增加火电机组，法国1977年度火电发电量为1140亿度，在发电能源构成中，火电占了55%，耗用进口石油约两千万吨。

法国政府对于核能的利用，从五十年代世界核电发展初期就给予高度的重视。当时法国为了取得军用钚建设了天然铀石墨气冷堆，在此基础上，着手研究和建设天然铀石墨气冷堆核电站，到1972年共建成9座石墨气冷堆核电站，总装机容量为230万千瓦（其中最大单机容量为54万千瓦）。法国在核电的探索阶段，除建设石墨堆外，还利用美国西屋公司的技术专利于1967年建成一座功率为28万千瓦的压水堆，并于同年建成一座功率为7万千瓦的气冷重水堆。法国在五十年代已开始独立研究快中子增殖堆，于1967年建成一座热功率为2.5万千瓦的钠冷快中子试验堆，于1974年投入了电功率为25万千瓦的钠冷快堆（凤凰堆）核电站，几年来运行情况较好，初步掌握了快堆技术。

法国政府为了减少石油进口量，研究了全国一次能源的总平衡，规划中一次能源构成的变化如下表：

项 目	1970年	1975年	1985年
石 油	60.1%	66.0%	41%
灶 炭	27.0%	15.0%	14%
天 然 气	7.6%	11.0%	16%
水 电	4.5%	5.6%	6%
屎 子 能	0.8%	2.4%	23%

从一次能源平衡的规划中可以看到，法国减少石油进口量，主要是依靠增加原子能来平衡。由于汽车、航空和化学工业所需的石油与天然气不能减少，因此不仅要求电力工业新增加的电量全部由核电站供应，而且还要求将一部分烧进口燃料与不经济的火电厂也停下来，由核电来代替。这样，根据规划，到1985年法国发电能源构成中核电比重将上升到68%。法国发电能源发已规划见图1-1。法国在较短的时间内，发电能源构成发生这样

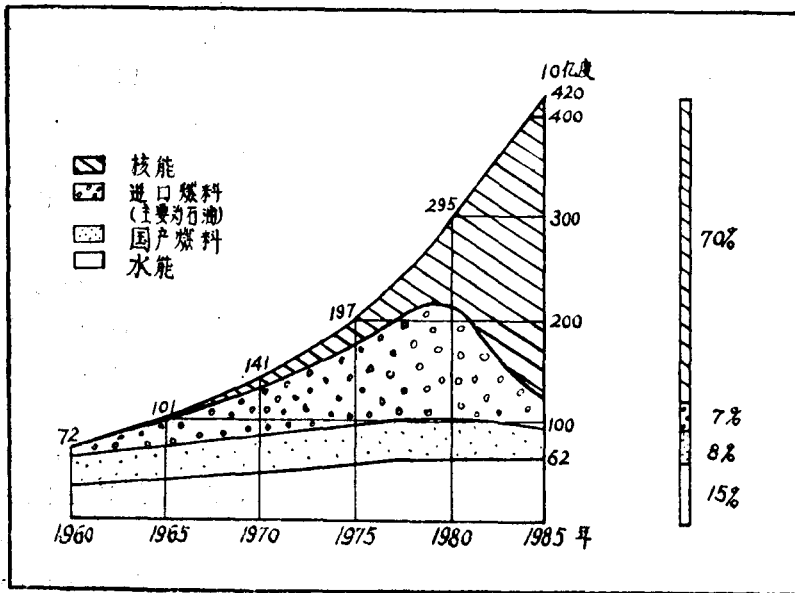


图 1-1 发电量上升趋势与核电比重图

大的变化是世界各国所少见的。法国为完成这一艰巨的任务，采取了许多重大的决定和措施，把法国的科研、设计、制造、安装和运行方面的力量全部地组织起来。法国原子能委员会是统管全国军工和民用原子能技术的部门。在发已核电工作中，决定将主要核电技术积极主动地交给民用部门掌握使用。法国电力公司将一批火电和水电技术力量转移到发已核电建设，事实证明，经过一定的培训，他们能够掌握核电技术，可以胜任核电站的施工、安装和运行工作。在核电设备制造方面，法国尽可能利用原有的工业基础，并由政府投资与国营企业合适新的核电设备制造厂，增加必要的生产能力。从1970年到现在，仅七、八年时间，已经初具规模。目前在费森汉姆（Fessenheim）核电站已投入了两套90万千瓦压水堆核电设备。现在有7座压水堆核电站正在同时建设，其中有4座核电站均安装4套90万千瓦核电设备，正在同时施工。到1981年或最迟在1982年，可以把22套90万千瓦核电设备全部投入运行。在核电设备制造厂的车间内也摆满了反应堆、蒸汽发生器、汽轮

发电机组的在制品和半成品，可以保证核电站建设的设备供应。法国核电站建设进展比较顺利，效果是比较好的，已经初步取得了一定的经验和成果。但由于目前受西欧经济形势的影响，法国核电的建设将比原计划推迟一些。但据法国电力公司估计，1985年核电比重占全国总发电量50%以上是较有把握的。

法国核电站建设有以下几个特点：

1. 为加快建设速度，选定最适用于法国的反应堆堆型和单机容量。

法国通过六十年代对核电站建设的探索和试验，经过三年的调查、研究和讨论，吸取了国内外核电站建设的经验，于1969年决定放弃石墨气冷堆，而建设大型轻水堆（轻水堆中又倾向于采用压水堆，并于1975年正式决定放弃沸水堆）。主要理由是：

（1）石墨气冷堆体积庞大，法国虽已建成54万千瓦的石墨气冷堆，但不易再向更大容量发展，而压水堆则可以制造90万千瓦到130万千瓦，将来还可能发展到180万千瓦。

（2）国际上大多数国家建设轻水堆，特别是压水堆，有了国际间广泛的技术交流和合作，有利于进一步加速核电技术的发展。

（3）石墨气冷堆的造价高，建设周期长，而压水堆的设备比较简单，造价低，发电成本便宜，1969年已可以与常规火电的发电成本相比（在石油涨价后，现在法国核电站的发电成本已明显低于火电）。

法国根据电网运行情况，选定了90万千瓦级单机容量的压水堆作为成批生产的标准设备，接着将建设130万千瓦级容量的压水堆。

同时，法国还决定以快中子增殖堆作为远期发展的堆型，在总结25万千瓦凤凰堆经验的基础上，集中科研力量建设120万千瓦的“超凤凰”快堆核电站，并准备在八十年代建设180万千瓦的钠冷快堆。现在法国的快堆技术已居世界领先地位。

2. 强调核电站建设的计划性和标准化、系列化。

法国重视核电站建设的计划性，使设备制造和电站施工有长期安排，做到组织措施落实。法国于1970年决定建设6套90万千瓦压水堆电站（要求在1979年前全部投产）。1974年决定建设16套90万千瓦压水堆电站（要求在1981年以前全部投产）。1976年决定建设10套90万千瓦和8套130万千瓦压水堆电站（部分厂址尚在选择中，但要求1985年以前全部投产）。以上三批共40套压水堆机组，总容量为3920万千瓦。在1970年订购的6套90万千瓦压水堆中，已有2套在费森汉姆（Fessenheim）核电站投入运行。初步看来，运行情况良好。其余4套也将于今、明两年内在布热伊（Bugey）核电站全部投入运行。

法国根据火电厂的建设经验，强调核电站建设的标准化和系列化。核电站主要设备，如反应堆，蒸汽发生器，主泵，汽轮机，发电机等全部采用标准设计、成批制造。核电站的设计也要求标准化。这样做，有利于制造、安装和运行，并可加快建设进度、降低造价、提高运行可靠性。

3. 引进国外技术专利与加强国内科研工作相结合，以达到尽快掌握压水堆技术，并有所发展。

在法国决定选用压水堆时，对大型压水堆的技术还掌握得不够，因此，决定从美国西屋公司引进压水堆技术专利，除结合法国具体情况作了必要的修改外（如60周波改为50周波），均照技术专利加工制造，这样，大大加快了建设速度。

法国与美国西屋公司签订的专利合同，将于1982年期满。为了在合同期满后，自力更生发压水堆核电站，摆脱技术专利的控制，法国重视国内的核电研究工作，同时也强调开展国际间的技术交流和合作，以求在核电领域内继续加快发压，如法国与美国西屋公司签订了共同进行压水堆研究工作的规划，分工合作，并共同分担科研经费。

法国核电的科研工作，由法国原子能委员会、法国电力公司和法美原子公司等共同负责，分工协作，扩大了科研队伍和力量。

4. 改组国营制造企业，由政府投资扩建官营的专业化工厂，形成了一个完整的原子能工业体系。

法国政府利用克鲁索—罗亚尔公司的重型机械加工力量，成立合营的法美原子公司，专门负责核岛的设计及核蒸汽系统主要设备的制造：反应堆压力容器，堆内部件，蒸汽发生器和稳压器等。核蒸汽系统的主泵以及控制棒的驱动机构分工由日立—西屋公司负责制造。法国还建立了制造核燃料组件、堆芯测量仪，以及电子控制设备的专业化工厂，从而形成了一个年产8套90万千瓦压水堆设备的核电工业体系。另外，国营的阿尔斯通（Alsthom）公司和机械电机公司（CEM）合并，成立阿尔斯通—大西洋（Alsthom—Atlantique）公司，负责制造供核电站用的汽轮发电机组。他们内部分工由原阿尔斯通公司的汽轮机和发电车间负责生产90万千瓦机组，由原机械电机公司分工负责生产130万千瓦机组。法国十分强调制造标准化、分工专业化，每一种主要设备都由一个工厂专业分工制造，以达到投资少，成本低，制造周期短，产品质量高，从而保证了国内发压核电的设备供应，提高了在国际市场的竞争能力。

5. 为摆脱苏美两霸对核燃料的控制，法国积极建造大型的浓缩铀工厂，做到核燃料自给有余，还能出口。

法国核燃料全部由国家控制。在法国原子能委员会的领导下，设立考其玛（COGEMA）子公司，负责勘探、开发和经营法国本土和海外的铀矿资源。在法国军用浓缩铀工厂（在皮埃尔拉特Pierrelatte）技术经验的基础上，新建了大型的Eurodif浓缩铀工厂（在特里卡斯丁Tricastin），设计年生产能力为10,800吨分离功，足够供应10,000万千瓦压水堆电站的每年核燃料消耗量。这个厂的资金以法国为主，与比利时、意大利、西班牙、伊朗等国合股投资，预计1979年投产，1982年可达到设计生产能力。该厂生产的核燃料大部分归合资国家分配使用，少量的余额销售给西德、瑞士、日本等国家。法国预计在八十年代中期可能出现低浓铀核燃料的短缺，1975年开始考虑筹建第二座大型浓缩铀工厂（Coredif厂），设计年生产能力为9000吨分离功，计划1985年可达到年产3000吨分离功。这两个大型浓缩铀厂建成后，法国将在国际市场上增加出口核电设备的竞争实力。但法国国内天然铀资源不足，在国外控制着非洲一些国家的铀矿，同时多方设法寻找新的来源。

（二）法国压水堆的特点

法国国内第一个90万千瓦压水堆（费森汉姆），以美国的Beaver Valley 1为原型。Beaver Valley 1热功率为266万千瓦，电功率为85.2万千瓦（1969年开工，1976年投产）。第二个订货布热伊，以美国的North Anna 1为原型。North Anna 1热功率为

277.5万千瓦，电功率为93.4万千瓦（1969年开工，1977年投产）。这两个压水堆的压力壳与活性区虽完全一样，而布热伊比费森汉姆功率约大5%，这主要是因为主泵流鼻提高了近5%。总平布置采用双堆，即两个堆合用一个核辅助厂房，汽轮发电机组与反应堆轴线是平行的。布热伊2号与3号用河水直接冷却，电功率为92.5万千瓦。布热伊4号与5号用冷却塔，每套机组两个冷却塔，电功率为90.5万千瓦。1974年订货的16台90万千瓦机组则采用标准设计，以第一台特里卡斯丁（Tricastin）为标准。它与布热伊基本上一样，不同处是：

1. 安全壳高度增加4米，设备进出口闸设在标高20米处，便于今后将蒸汽发生口在壳体运出。

2. 核辅助厂房也作一些局部修改，以利于操作与维修。

3. 燃料厂房面积并没有增加，但缩短了废元件筒的间距，从535毫米减少到410毫米。从而增加了废元件储存鼻，由4/3炉增加到7/3炉料。

4. 冷却塔改为每套机组一个。

特里卡斯丁电站的简单技术介绍、参数及平布置图等见附录一。

美国设计的二回路不设除氧口，除氧是在凝汽口中进行的。据法方介绍，其除氧效果不很理想，且凝结水泵与给水泵之间无一缓冲，故准备在1976年订货的系列中增加除氧口。

为保证蒸汽发生口安全运行，对给水水质有严格的要求。海水冷却的压水堆电站中，采用双层管板凝汽口，外管板为不锈钢，内管板为铜合金。管子则用钛合金管。并且，凝水要全流鼻除盐。

法国设计的压水堆电站，年利用小时指标为6600。

法国采用美国西屋的专利，但法国的电网与美国的电网，周波不一样（前者为50周/秒，后者为60周/秒），保护定值也不一样，所以法国相应进行了修改。由于周波变了，主泵转速也变了，为了达到同样流鼻与扬程，叶轮就要作修改。同时，自振频率也变了，为此进行了试验，并在蒸汽发生口中增加一个隔板（从7个增加到8个）。

电压与周波的变化，影响主泵的转速与运行，从而影响活性区的安全，因此，必须规定：

1. 能发出额定功率的周波与电压的允许变化范围。

2. 在异常情况下，一定时间内的允许功率。

3. 事故范围内，必须立即停堆或有一定时滞停堆。

电网故障时跳闸的延滞时间，美国规定为0.3秒，法国规定为0.9秒。另外，当周波的变化速率太快时，飞轮作用不足，流鼻降低，也必须迅速停堆。

周波与电压变化均影响流鼻。但由于流鼻测鼻误差较大（一般测弯头的压降误差为±8%），只能作为部分失去流鼻时的保护。美国采用电压与周波同时保护的办。电压降到70%额定电压，零点几秒跳闸解列（法国规定为1.2秒动作）。周波降到47周/秒以下时，0.1秒内动作停堆，主泵开关也跳闸。这个保护系统的缺点是周波与电压分开，未考虑综合作用。其优点是简单。法国则采用测鼻主泵的转速来保护。在电动机轴上接一测速装置，测鼻时间为0.2秒，准确度为±0.1%转速（即±1.5转/分）。主泵转速降到93.8%时，即与电网解列，只供厂用电。

法国对130万千瓦压水堆电站作了以下一些修改：

1. 总布置改变：(1) 双堆改为单堆。核辅助厂房不再合用了，各有独立的一套。这样在基建与维修时可不互相影响；(2) 汽轮发电机组与反应堆在同一轴线上。

2. 安全壳改用双层安全壳。内层为予应力混凝土，不加钢衬，外层为钢筋混凝土。两层之间保持负压。据说安全部门认为双层安全壳更安全些，因为单层安全壳的钢衬一旦泄漏，就不能密封。

3. 蒸汽发生口的传热面积有较大增加，蒸汽压力提高到75巴。

(三) 法国为压水堆开展的研究试验工作

西屋公司的压水堆经过20年不断发展与改进，已基本上定型，趋于成熟。但仍存在一些问题尚待解决。所以，法国对压水堆开展了大量的试验研究工作，以进一步提高压水堆的安全性、可行性与经济性，并准备在1982年与西屋公司合同期满后，可以独立发展。

法国目前试验研究的重点有：

1. 失水事故。法国原子能委员会在卡达拉希核研究中心化了二亿五千万法朗造了一个3万千瓦的游泳池堆的特殊装置来综合研究失水事故的机理与改进措施，称为Phebus。我们还参观了二个单项试验回路：一个是研究失水事故时控制棒及导向管的行为的，称为Superbec回路；一个是研究主泵二相行为的，称为EVA回路。

2. 蒸汽发生口。主要研究管子腐蚀问题及汽水分离效率。法国原子能委员会、法国电力公司、法美原子公司及西屋公司于1976年签定的合作计划重点就是研究蒸汽发生口的腐蚀问题。目前蒸汽发生口汽水分离效率尚达不到设计指标，准备在EVA回路上进行汽水分离的试验。

3. 燃料元件。主要研究芯块与包壳的作用，以及包壳在长期辐照下的性能。压水堆目前一般带基本负荷，变负荷受到严格限制，主要是燃料元件的问题。法国考虑到大号建造压水堆电站后，压水堆电站也要参加调峰，所以，现在在卡达拉希的小型模式堆上进行变负荷试验。法国也在研究燃料元件制造的新工艺，在若干细节上与美国西屋的不同，亦正在小型模式堆上试验。

4. 堆内部件振动问题。这个问题虽已解决，但在设计有变更后，仍要做模拟试验。如现在的热屏壳不是一个元筒，而是在对应压力壳受中子通量最大的四个部位加四块钢板，用螺栓贴在吊兰上，为此，就要进行模拟试验及实测。在小型模式堆CAP上并试用声发射来探测堆内部件的机械振动。

5. 压力壳以及其他材料的研究。对压力壳材料主要是开孔断裂力学的研究、新超声探头的研究等。

(附录 1-1) 法美原子公司研究计划

1. 1977年研究计划

(1) 燃料1850万法朗; (2) 重型设备(压力壳、蒸汽发生口、稳压器)2580万法朗; (3) 其他设备(管边、配件、阀门、堆内部件)1810万法朗; (4) 控制—调节300万法朗; (5) 正常运行工况540万法朗; (6) 事故工况520万法朗; (7) 维修、在役检查500万法朗; (8) 探伤方法440万法朗; (9) 其他1010万法朗。总计为9550万法朗。

2. 法国原子能委员会与法美原子公司合作计划: 1971年开始研究堆内部件的振动(“Safran 1”)。1975年, 1976年11月正式签定协议, 近50项合作项目, 利用法国原子能委员会的回路与实验室。

3. 法国原子能委员会、法国电力公司、法美原子公司、西屋公司四方合作计划1976年11月5日签定协议。1976年(7月1日)开始22个项目, 其中三分之一是有关蒸汽发生口的问题(如腐蚀、denting等)。1977年开始7个项目。四方经费, 每年三千万美元。

4. 其他合作计划: 1977年8月, 法国原子能委员会、法国电力公司、法美原子公司开始的合作计划, 有些项目正在进行。

(1) 西屋—法美原子公司—法国原子能委员会: 泵的两相行为。

(2) Studvik国际计划: 燃料试验。

(3) 欧洲原子能计划: 压力壳破裂几率。

(4) 与法国电力公司的几个计划等等。

二、压水堆核电站的厂址选择

(一) 法国压水堆核电站厂址规划

与核电发展计划相适应, 在选厂方面法国做了大量工作。以法国电力公司为主, 在法国内进行了普遍踏勘, 开始时初选了30个厂址, 于1974年底把这些厂址提交当地公众讨论, 征求意见, 并很快集中意见, 确定其中12个厂址, 进一步开展工程选厂工作, 作为建设核电站的对象。他们认为要选一个经济合理的核电站厂址是不容易的, 需要做大量的工作。所以核电站的选址必须早抓, 并且要有一个长远规划。

图2-1为法国压水堆核电站厂址位置图。可看出, 法国压水堆核电站厂址共为17个。其中1973年前已确定的厂址为5个, 它们是舒兹(Chooz)、费森汉姆(Fessenheim)和三个石墨气冷堆的扩建厂, 即布热伊(Bugey)圣洛朗(Saint-Laurent)、希农(Chinon)。另外12个为1974年底规划选厂时确定的点。17个厂址中海边电站占5个。每个电站装机大多是4台90万千瓦。

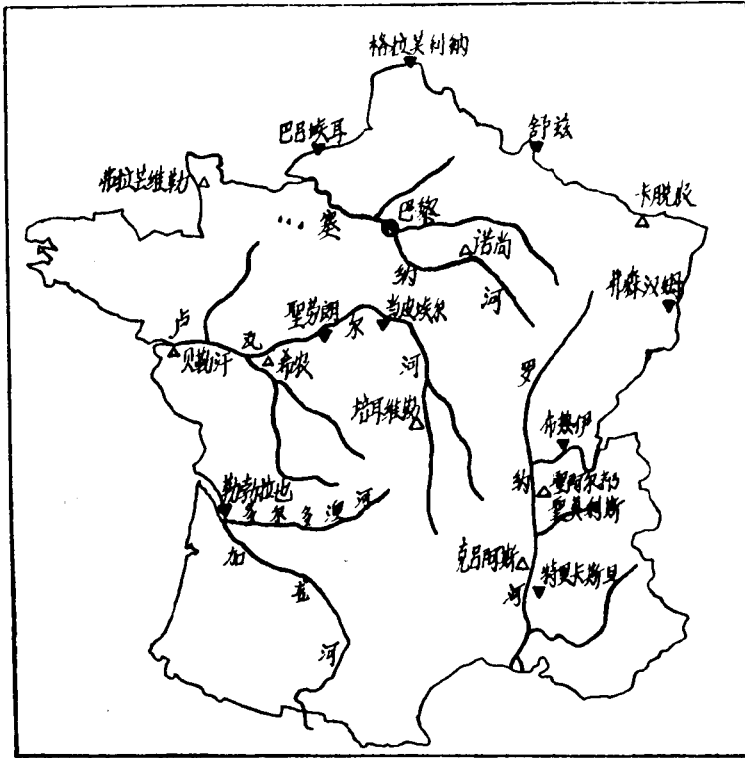


图 2-1 法国压水堆核电站厂址位置图

(二) 厂址选择考虑因素

据介绍，法国在选厂方百考虑以下几个因素：

1. 电网 法国电力公司认为首先要考虑接近负荷中心，与电网连接方便，以取得最外的高压输电线路，同时要考虑与第二个电压等级的电网连接作为厂用电的备用电源。法国400千伏电网是与邻国相连的。除此以外还有地方电网225、150、63千伏。因此，核电站一般输出电压为400千伏，同时有备用变压器与225千伏或次一级的网络相连，以取得备用厂用电。

2. 地质和地震 法国在选厂时很注意选择好的地基，他们认为最好是选择岩石地基，因为90万千瓦压水堆核岛部分荷载为50~60吨/米²，他们说法国的压水堆电站没有采用过打桩基础。

我们参观的布热伊电站在罗纳河边，那里的地质他们称为冲积层，实际上表层是砂卵石，夹有少量粘土（厚度6~10米），下层为磨砾层（Molasse），再下面就是岩石。持力层为磨砾层。地基承载力可达60吨/米²，因此地基没有作特殊处理，费森汉姆电站的地质与此类似。

我们参观的格拉芙利纳（Gravelines）电站建在海边。据说表层为砂夹淤泥。下面为25~50米厚的密实砂层，再下面为粘土，厚度约100米。粘土以下为岩石。他们先把表层

挖掉，在砂层上做一块大的钢筋混凝土平台，反应堆和汽机房的主辅厂房基础均建在这块大平台上，以避免厂房之间的差异沉降。大平台允许沉降60~80厘米，据他们说，土建和安装完成后，实测沉降约20厘米，大平台是否会发生不均匀沉降呢？他们认为法国对此是有经验的，如果发生不均匀沉降，可在它下面浇水泥。在大平台四周设有测身沉降的装置，可以监测。

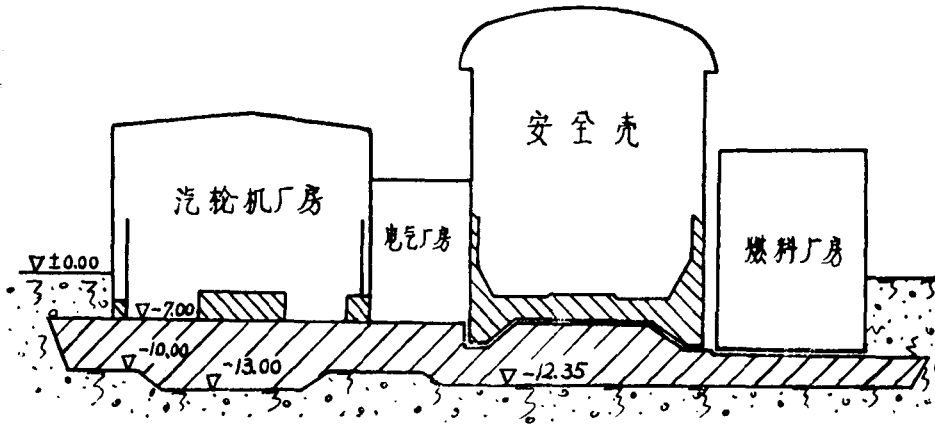


图 2-2 格拉芙利纳电站钢筋混凝土大平台

据介绍，大平台的上、下层配有钢筋，中间为矿渣混凝土。估计该块大平台混凝土量大约为15万米³（二台机组）。

地震的问题对于法国来讲不太突出。因为法国不是强地震的国家。他们认为核电站厂址应尽量避免选在高烈度地震区，否则设备和土建抗地震的设施将会带来昂贵的投资。

法国规定：核岛部分设计烈度必须在地震基本烈度上加一度。例如布热伊（Bugey）电站，厂址地震基本烈度为7度，核岛设计烈度为8度。法国90万千瓦压水堆标准设计中核岛部分的设计烈度为8度，即SMS=0.2g（注：SMS为安全升级地震 Seisme Majoré de Securite, g为重力加速度）。

据介绍，法国为伊朗提供的二台90万千瓦机组，SMS=0.3g；为南非提供的二台90万千瓦机组，SMS≈0.6g。

法国的水平加速度与地震烈度换算关系如图2-3所示。

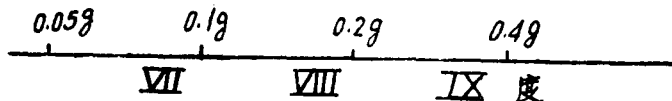


图 2-3 水平加速度与地震烈度换算关系

8. 冷却水 法国90万千瓦压水堆机组根据厂址情况分别采用河水、海水和冷却塔冷却三种方式。主要是改变凝汽口的冷却面积和材料。法国核电站厂址大部分在河边和海边。从经济性考虑希望采用直流循环，但当河水水量不足时，也不得不采取冷却塔二次循环供水方案。

1台90万千瓦压水堆约需冷却水量40~50米³/秒，若采用冷却塔，则须补给河水约

2~8米³/秒。设计中必须考虑河流的枯水流势，以保证在枯水时也有充足的水沉，同时还要考虑废水排放要有良好的稀释条件。例如布热伊电站在罗纳河边，平均流势为450米³/秒，枯水期平均流势为120米³/秒。1号机（石墨气冷堆56万千瓦）及2、3号机（90万千瓦）均采用直流供水，而4、5号机就采用二次循环供水，每台机组有2个冷却塔。

在座谈时，法美原子公司提出假如冷却水温度过高，将增加设备投资，理由是标准设计配的设备冷却水系统都已标准化，由于冷却水温度升高将增加这些设备的冷却面积，从而增加投资。特里卡斯丁电站河水最高温度25℃，格拉芙利纳电站海水最高温度20℃。

4. 交通运轨 座谈中法方多次强调要考虑交通运轨的条件，还特地放映压力壳运到比利时蒂昂日电站过程的电形。他们认为选厂中要考虑运轨方便，减少中转次数。主要应考虑压力壳、蒸汽发生口等大件设备的运轨，也要考虑新燃料、废燃料的运轨方便。

各大件设备尺寸和重量见表2-1。蒸汽发生口过去是分两段运轨，到现场焊接，现在改为在制造厂焊接，整体运轨。

表2-1 主要设备重量

设备名称	尺寸（米）	重量（吨）
压力壳筒身	φ4.4, 高10.3	263
蒸汽发生口	φ4.468, 高20.6	300
发电机定子	φ3.95, 长12.1	335
发电机转子	φ1.68, 长15	179
汽机低压转子	φ5.3, 长9.8	147
汽水分离再热口	φ3.1, 长15.56	79.5

注：以上尺寸中未计包装尺寸。

5. 人口密度 法国电力公司认为人们对于核电站对周围居民的形响非常敏感，主要应作宣传工作，同时要做大量的调查分析和研究工作。据说，电站当地的卫生部门对电站要求很严，设立监测池，以检查废水是否可以排放。

对于电站周围居民分布，法国政府没有这方面的专门规定。他们认为应选择人口密度较小的地区，但是围堰外边就可以允许居住。例如费森汉姆电站下沉500米就有水电站，电站生活区距电站仅1公里，费森汉姆镇距电站2公里。布热伊电站距里昂35公里，5公里范围内1300人，40公里范围内130多万人，预计到2000年达200万人。布热伊电站的初步安全分析报告中考虑电站在失水事故情况下，可能对居民的形响，是以反应堆400米处的居民为计算依据的。在事故后最初2小时内，对成年人的剂量：外照射为 4.3×10^{-2} 雷姆，对甲状腺为0.9雷姆。对于400米处房间里的婴儿（6个月）由于吸入碘而产生的甲状腺剂量。在事故最初2小时内小于1.6雷姆，10天内小于17雷姆，均小于允许值。而且计算是非常保守的。

又如格拉芙利纳电站与邓克尔克新港相邻。

又据费森汉姆电站资料介绍：生活在电厂范围内，全部饮用河水和吃所在地蔬菜的每个人，其年吸收剂量低于1毫雷姆，而在法国的平均天然本底为125毫雷姆。

6. 厂区占地 全厂占地百积没有严格的规定, 但主厂房由于标准化了, 因此占地百积是确定的, 2台90万千瓦机组的主厂房(仅指堆、核辅助厂房和汽机房)占地百积为 150×200 米²。

各电站占地百积见表2-2。

表2-2 各电站占地百积

电站名称	装机台数	占地百积	附注
费森汉姆	2台90万千瓦	25公顷	估计要加冷却塔
	最终6台90万千瓦	106公顷	
布热伊	4台90万千瓦 1台54万千瓦	100公顷	有4个冷却塔
特里卡斯丁	4台90万千瓦	30公顷	
格拉美利纳	4台90万千瓦 预留4台130万千瓦	150公顷	

7. 其他 法国对于气象条件没有特殊规定。对于洪水则考虑千年一迁最高水位, 若上沈有坝, 则考虑在百年一迁洪水下垮坝的可能性。

对于一些危险的工业也要考虑是否影响电站的安全性, 例如格拉美利纳电站旁边就是一个大油库和气库, 并有油码头(邓克尔克新港)。最近的油罐距电厂仅500米, 他们就采取多筑20米高的堤坝, 并设防外灭火的设施。

由于法国在西北部设有废物库, 故核电站选厂不考虑选择废物长期贮存的地方。据格拉美利纳电站人员讲在厂里只考虑贮存15天。

(三) 选厂工作

法国对选厂工作分为三个阶段。

1. 第一阶段, 初选。这与我国规划选厂相似。选择几个地方, 进行下面儿方面的比较: 水沉; 地质; 地震; 气象; 土地利用; 人口分布密度; 交通运输; 电网; 环境保护。工作方法主要是调查研究。据法方讲这一阶段一般需4~6个月。

2. 第二阶段, 厂址具体技术条件的调查研究, 这与我国工程选厂相似。在第一阶段基础上对已确定的厂址进行具体技术条件的调研和勘测工作。

(1) 水沉 调查水鼻、水温、水位, 并取水样作化学分析。调查洪水和潮汐等水文资料。并分析取排水的可借性, 以确定取水方案, 对废水排放条件也要进行分析。法国对取排水工作很重视, 常做水工模型试验, 例如格拉美利纳电站水工模型试验在巴黎水科所做了一年半的试验。其供排水拒迎工程见图2-4, 进水拒流鼻 400 米³/秒(已考虑今后扩道4台130万千瓦机组的用水鼻)。

(2) 地形、地皂 进行航空测绘、地形测鼻、地皂描述。

(8) 地质 区域地质调查、厂址地质测绘、钻孔并做试验, 提出地质报告、地质

7月1日至1969年8月30日共做了3年的气象工作，测了离地百5米、35米、55米、80米的气温，并测了在地百上45米、80米的风向和风速。

三、运行与施工中的压水堆核电站

(一) 费森汉姆核电站

费森汉姆核电站位于来因河西岸，米卢兹(Mulhouse)镇东北26公里处。在该厂南百约一公里处有一座16.2万千瓦的水电站。费森汉姆核电站的循环水取自水电站的引水汜边。该汜边的流率为400~1300米³/秒。电站的备用电沅由水电站的225千伏线路供电。

1. 电厂布置

电厂总占地百积为106公顷，规划装6台90万千瓦级的压水堆型机组。厂房按双堆组合布置设计。在安全壳周围为核辅助厂房。两台汽轮发电机的厂房互相连通。安全壳与汽机房之间为主控制室、厂用电系统和柴油发电机组。为了确保在全厂仃电时反应堆能安全仃闭，每一个反应堆都备有两台3520千伏安的事故备用柴油机组。予应力混凝土安全壳的外径为38.7米，高51.27米。汽轮发电机厂房总长度(两台)为177.6米，跨度54.1米，高43米，汽机运转层标高15.5米。运转层以下为沓浇钢筋混凝土结构，运转层以上为钢结构。汽轮机由1个双流高压缸和8个双流低压缸串级组成。高压缸的排汽经过4台汽水分离再热口后进入低压缸。发电机的额定容昇为92.3万千瓦，转速1500转/分，冷却方式为水—氘—氘。循环水泵房为露天式布置，8根循环水管由核辅助厂房下通到凝汽口。为了在调试一回路的同时调试汽轮发电机组，在汽机房出线侧的场地上装有8台可拆卸的燃油锅炉。每台蒸汽流昇为60吨/时，汽温为220℃，汽压为20巴。法国电力公司认为，在取得费森汉姆和布热伊压水堆核电站汽轮机组的调试经验后，今后可改用核蒸汽调试。一回路、二回路和辅助厂房占地总百积约为8万平方米。90万千瓦级的压水堆共有8个回路，因此在安全壳内的主要设备为压力壳、3台蒸汽发生口、8台主泵和1台沓压口。

2. 现场施工调试沓况

施工现场的起重机具，除移动式汽车吊外，还有4台固定式塔吊和8台移动式塔吊(平均容昇为200吨)。予应力混凝土安全壳的施工过程是由下到上拼焊6毫米厚的反应堆密封钢壳的筒体，然后利用钢壳作内模板浇沓予应力混凝土垚。在封顶以前用一台起重能力为200吨的塔吊将反应堆大厅的元形桥吊(起重能力为300吨)从安全壳的顶部吊入装好。封顶时先将现场予装好的安全壳钢顶盖(重约160吨)或沓体，或分成两半吊到50米高处进行封顶焊接。予应力垚用300~400号水泥。在浇沓予应力顶盖时可用内支撑方法或密封沓压方法承受浇沓的压力。按基沓的进度，现场混凝土的工作昇应在30个月内浇完8.5万立方米，其中有19个月的平均工作昇为3400立方米。混凝土的运轨工具为塔和吊混凝土泵。

法国核电站的施工组织工作和沓体调试工作均由法国电力公司区局的基沓部门负责，

设备安装和局部调试由制造部门负责。

费森汉姆核电站一号机组施工过程推迟了约22个月，其主要原因是：

(1) 压力壳筒体的6个环件在美国制造，交货推迟了1个月。

(2) 1975年有人用炸药将反应堆压力壳的顶盖炸坏，临时改用第二台机组压力壳的顶盖而推迟了1个月。

(3) 各系统中大口径碳钢管路的弯头是用钢板模压对焊制成。在探伤中发现焊缝约有1/100~1/10的深度没有焊透。全部切断重新焊接推迟了6个月。

(4) 在一回路设备和管路安装焊接好并经过水压试验后，发现蒸汽发生口的下封头接管段的不锈钢衬里脱焊，为了修复推迟了4个月。

(5) 罢工使工期推迟了1个月。

(6) 为了测算反应堆热工水力参数而装设的堆内测算仪表出了问题。决定拆除并改在布热伊核电站五号机组上试验，这样推迟了1个月。

(7) 在第二台机组的调试过程中发现一回路支接管处的热套管(防止热冲击)脱焊。经检查第一台机组也有同样问题。为了减少振动而修改设计，将热套间隙缩小，推迟了2个月。

(8) 核燃料组件从15×15改为17×17。由于要相应地改变反应堆上部结构而推迟了6个月。

一号机组于1977年3月7日达到首次临界，4月6日并网发电。在试运行中发现下列问题：(1) 5月2日当带到30%额定负荷时，第三个低压缸的静叶片变形将转子拉坏。由制造厂查明了原因并更换了部件。(2) 压力壳的“0”形环泄漏，经分析认为是在安装时密封面没有清洗干净造成的。因此，又重新更换了“0”形环。(3) 在控制棒的导向管座的密封焊口处发现有硼结晶的沉渣。通过观文，每分钟约有一滴水漏出。着色探伤后找到全部缺陷并进行了处理。以上三个故障共行了3.5个月，到1977年8月末又重新并网，10月24日带到满功率。(4) 在第二次升负荷过程中发现二回路的凝汽口和调速汽门泄漏。停机三次进行了处理。(5) 在达到满负荷前当负荷变化、水温波动时发现给水泵的密封垫圈间隙由4毫米减少到2毫米，破坏了密封。分析是设计上的问题，于是将密封垫圈改由6个螺钉固定，并开了一个压力平衡孔。(6) 蒸汽发生口的给水系统设计采用加砷酸盐($\text{Na}_3\text{PO}_4 + \text{Na}_2\text{HPO}_4$)处理，后来发现它在蒸汽发生口中会生成NaOH，腐蚀蒸汽发生口的管子。所以改为加氨和联氨处理。(7) 发现凝汽口蒸汽旁路管的联箱因用两种不同材料相焊，发现有裂缝，进行了处理。

两台机组的施工进度见表3-1。

8. 运行性能

费森汉姆核电站第一期工程为两台机组，净电功率为2×89万千瓦。据法方介绍，每一台机组利用小时的设计指标在交付运行后的第一年不低于3000小时，第二年为6000小时，第三年及以后为6600小时。最大可能利用小时为8000，每年换料时间为4~6周。第一台机组到1978年2月底共发电12.38亿度。

机组由冷态到满功率的启动时间为36小时，其中由冷态到热态的启动时间为32小时，从热态到满功率为4小时。当反应堆由于误动作而停堆或其他原因临时停堆时，如果要求