

利用核反应堆通过现代化改造实现国家能源行业脱碳的计划



KM4.1 第三代反应堆初步可行性研究——下奥得河 – DOLNA ODRA

承包商：卡托维兹能源设计股份有限公司



修订版 00

卡托维兹，2025年6月



由 REPOWER 倡议组织编制的非约束性、非官方译文，供内部使用



目录

1.	项目基本信息	8
2.	投资需求市场分析	8
2.1.	波兰电力市场的现状	8
2.1.1.	电力供需结构	9
2.1.2.	国家电网系统装机容量结构	13
2.2.	波兰电力市场发展预测	15
2.2.1.	装机容量预测	15
2.2.2.	电力需求预测	18
2.2.3.	发电资源充足性分析	19
2.2.4.	所需额外可用功率	20
2.3.	系统结构优化选择	21
2.4.	能源市场分析总结	24
3.	现有设施基础设施的技术状况详细诊断，重点分析其在核电机组运行中的适用性，包括发电厂运行所需的基础设施，即输电网络、道路和铁路基础设施、外部和内部水源	25
3.1.	基本信息	25
3.1.1.	现有发电机组	25
3.1.2.	计划中的发电装置	25
3.2.	最佳可用技术结论及相关计划中的燃煤机组关闭	26
3.3.	开放式冷却系统在核电站中的应用特性	28
3.4.	建筑与道路部分	29
3.4.1.	现有开发计划说明	29
3.4.2.	现有道路系统描述	30
3.4.3.	现有铁路系统描述	31
3.4.4.	地质与水文条件描述	33
3.5.	自用电力供应系统	35
3.6.	电力输出	35
3.6.1.	总体特性	36
3.6.2.	块状变压器	36
3.6.3.	块状变压器的前场	36

3.6.4.	电力输出线路	37
3.6.5.	克拉伊尼克变电站	37
3.6.6.	其他电力技术系统	38
3.7.	供水与污水处理基础设施（不含技术设备）	38
3.8.	现有设施基础设施利用可能性诊断——总结	39
4.	投资过程中所需技术供应商的市场分析	40
4.1.	假设	40
4.2.	供应商市场	40
4.3.	推荐用于进一步分析的反应堆（核电站）类型	45
5.	所选解决方案说明	45
5.1.	拆除工作的总体范围	45
5.2.	推荐用于进一步分析的冷却系统类型	47
5.3.	现有开放式冷却系统的改造方案	47
5.4.	建筑区域	47
5.5.	自用电力供应系统	51
5.6.	功率输出	52
5.6.1.	法律条件	52
5.6.2.	块式变压器	53
5.6.3.	块式变压器的前场	53
5.6.4.	输电线路	54
5.6.5.	科济涅茨变电站扩建工程	54
5.7.	选定电抗器的初步技术说明	54
5.8.	EPR核电机组系统	57
5.9.	核电站功率调节系统	59
5.10.	建筑部分	60
5.11.	工艺平衡	62
6.	预计投资成本	66
6.1.	资本支出结构	66

6.2.	方法论	67
6.3.	确定投资支出的百分比分布	67
6.4.	根据新闻报道确定EPR-1600机组的单位建设成本指标	68
6.5.	确定与计划投资地点相关的额外成本和节省	69
6.6.	确定资本支出	71
6.7.	绿地与棕地项目对比	73
7.	针对既定假设的经济效益分析，扩展至投资风险分析（对法律经济环境变化的敏感性分析），	74
7.1.	研究对象与目的	74
7.2.	假设	75
7.2.1.	投资支出	75
7.2.2.	贴现率	75
7.2.3.	汇率	76
7.3.	运营成本	76
7.3.1.	燃料成本	76
7.3.2.	乏燃料处理费用	77
7.3.3.	补水费用	78
7.3.4.	员工薪酬和福利费用	78
7.3.5.	财产保险费用	78
7.3.6.	核损害民事责任保险	78
7.3.7.	不动产税	78
7.3.8.	维修费用（机组维护）	79
7.3.9.	未来拆除设施的费用	80
7.4.	LCoE结果	81
7.5.	敏感性分析	82
7.6.	经济分析总结	84
8.	针对投资方案特征的核电机组管理与维护所需能力分析（基于所需能力库，该库是研究任务6的成果）	85
8.1.	现代化发电厂和发电机组工程技术人员所需能力扩展或获取程序的核心要素	86
8.2.	核电站就业人数最多的岗位汇总	86
8.3.	燃煤电厂雇员最多的岗位一览	87
8.4.	核电站最缺岗位和燃煤电厂最剩岗位汇总	89

8.5.	核电站部分岗位信息汇总	91
8.6.	核工程师	91
8.7.	核反应堆操作员	93
9.	核反应堆发电机组现代化改造与运行中的组织与安全风险分析（基于研究任务3的成果，该任务制定了关键要求及针对特定地点的核安全建议）	97
9.1.	法律要求	97
9.1.1.	核电站选址的一般要求	97
9.1.2.	核反应堆和核电站设计的一般要求	98
9.2.	下奥德河核电站	100
9.2.1.	设施总体特征	100
9.2.2.	核设施改造相关的安全评估	101
9.2.3.	放射性废物管理	103
9.2.4.	应急响应	103
9.2.5.	网络安全	103
9.2.6.	安全的社会与政治层面	103
9.2.7.	核材料运输安全	104
9.3.	总结	104
10.	投资过程中法律和立法障碍的诊断	104
10.1.	获取核设施建筑许可的程序路径说明	104
10.2.	投资过程中的法律和立法障碍	109
10.2.1.	分散且不精确的法规	109
10.2.2.	参与审批流程的行政机构在获取必要许可和批准方面缺乏经验	109
10.2.3.	核电站建设项目评估的两条独立路径以及核设施缺乏独立豁免路径	109
10.2.4.	缺乏现有设施的改造途径	110
10.2.5.	建议：	110
11.	投资时间表	110
12.	SWOT分析	111

表格目录

表1 2013-2023年电力消耗量	10
表2 2013-2024年选定期间能源生产和消耗的平均变化率	12
表3 电力市场拍卖中的燃气轮机	17
表4 2034年电力生产资源结构	18
表5 电力系统所需额外净备用容量[兆瓦]	21
表6 与采用既定结构的能源系统协同工作的能源存储参数优化结果	23
表7 根据[3]、[4]计划接入输电网络、Krajnik变电站及邻近变电站的选定设施	26
表8 开放式冷却系统与冷却塔的比较	28
表9 B1-B11区块总体特征	36
表10 第三代/第三代+核电站对比表	42
表11 下奥德河地区EPR-1600机组预测参数	64
表12 下奥德河地区EPR-1600机组预测年发电量数据	65
表13 EPR-1600机组预计投资额百分比分布	68
表14 根据AACE国际推荐实践对资本支出估算精度的分类	71
表15 下奥德河核电站EPR-1600级反应堆机组单台建设成本估算	72
表16 基于假设的工程量清单数据计算的潜在避免成本	73
表17 成本比较	73
表18 投资支出计划，百万波兰兹罗提净值	75
表19 预期汇率	76
表20 核燃料价格来源	77
表21 核电站最常见职位汇总	87
表22 燃煤电厂最常见职位汇总	88
表23 燃煤电厂与核电厂主要岗位缺员与超员情况汇总	89
表24 SWOT分析	111

图示目录

图1 波兰电力市场	9
图2 2009-2023年波兰电力消耗量	10
图3 2023年波兰电力消耗结构	11
图4 自2012年以来波兰的电力生产与消耗	12
图5 自2012年以来波兰电力生产结构	13
图6 近年来国家电网系统装机容量	14
图7 可再生能源发电装机容量	15
图8 参与中央平衡机制的燃煤机组停运时间表。截至年底的数据。	16
图9 2024-2040年预测年度电力需求	19
图10 2025-2040年LOLE指标平均值[小时/年]	20
图11 2025-2040年间EENS指标平均值[GWh/年]	20
图12 2023年电力需求及2035年和2040年电力需求预测	22
图13 2035年和2040年发电结构预测	23
图14 退役机组装机容量	27
图15 下奥德河电站入口布局	30

图16 下奥德河电站周边道路布局	31
图17 下奥德河发电厂区域国家铁路线示意图	32
图18 下奥德河发电厂区域铁路线路示意图	33
图19 洪水危险区域	34
图20 克拉伊尼克变电站 [5]。	38
图21 AP-1000机组蒸汽流程图	44
图22 APR-1400机组蒸汽流程图	44
图23 EPR-1600机组蒸汽流程图	45
图24 燃煤电厂主要设施位置及新建BGP燃气轮机组投资区域	46
图25 EPR核反应堆主要设备布局	48
图26 下奥德河核电站EPR反应堆的布局示意图	49
图27 机组场区拓扑布局示例	53
图28 反应堆建筑	55
图29 RCP泵剖面图	56
图30 EPR反应堆三道安全屏障示意图	58
图31 不同类型系统电厂负荷（功率）变化速率比较	60
图32 EPR核电站主要建筑	61
图33 EPR-1600机组带冷却系统的蒸汽流程图	63
图34 根据国际原子能机构数据，2021-2023年欧洲核电机组可用率指标	64
图35 资本支出结构	66
图36 LCoH计算公式	74
图37 历年核燃料成本	77
图38 单位资本成本（Capital）	79
图39 单元运营成本（Operating）	80
图40 EPR-1600机组年度运营成本	81
图41 棕地与绿地项目LCOE对比	81
图42 指定LCOE结构（Brownfield）	82
图43 敏感性分析结果——投资支出与核燃料价格	83
图44 敏感性分析结果——机组可用性	83
图45 变动贴现率的敏感性分析结果	84
图46 简化流程图：核设施建筑许可审批流程。	108

附件目录

1. 土地利用规划
2. 投资时间表
3. 核电站与燃煤电厂职业清单

1. 项目基本信息

该项目的目标是制定一项计划，通过采用第三代/第三代+和第四代核反应堆进行现代化改造，实现国家能源部门的脱碳。

波兰电力系统性质的持续变化，强化了建立其稳定安全的一致性结构的必要性。脱碳计划通过实施七项研究任务制定，旨在为煤炭到核能政策领域的未来投资进程提供路线图。该项目计划启动国家能源转型集群（KTE），为国内发电厂和热电厂转型过程中的行动提供组织支持。

该项目由五个实体组成的联合体实施：西里西亚理工大学、气候与环境部、Energoprojekt-Katowice SA公司、核化学与技术研究所以及索别斯基研究所基金会。项目资金来源于国家研究与发展中心第六届“Gospostrateg”竞赛。

2. 投资需求的市场分析

本项目的主要目标是研究用第三代/第三代+核反应堆的核能替代电力生产领域中的碳能源的可能性。该解决方案与欧洲整体脱碳计划及实现零排放欧洲电力系统的目标完美契合。

本章将介绍波兰电力生产行业的现状及其未来几十年的发展预测，其中包括其他项目，如计划中的核电站和新的可再生能源设施，这些预测是基于政府公布的计划、战略文件和输电运营商的分析。

2.1. 波兰电力市场现状（）

波兰电力市场依据1997年4月10日颁布的《能源法》及其后续修订条款运作。监管市场运作法律事务的机构是能源监管局（URE），输电系统运营商为波兰电网公司（PSE SA），而电力交易则通过商品能源交易所（TGE）进行。

2024年，波兰电力市场的数据如下：



电力生产

○ 166.99太瓦时

峰值需求

○ 28.66吉瓦

总装机容量

○ 72.8吉瓦

平均批发电价

○ 418 PLN/MWh

数据来源： ARE、PSE、TGE。

图1 波兰电力市场

2.1.1. 电力的供需结构

所需的电力生产水平取决于特定电力系统内的电力需求。过去十几年间，波兰电力消耗呈上升趋势。然而，2019年至2020年之交，由于全球新冠肺炎疫情爆发，电力消耗出现大幅下降。2020-2021年间政府宣布的封锁措施导致工业、建筑业和小用户领域的电力消耗大幅减少。直到2022年，电力消耗才恢复到新冠疫情爆发前的水平。

下表和图表展示了过去十余年各行业用电量的详细数据。2024年的数据尚未公布，将于2025年底发布。

表1 2013-2023年电力消耗情况

行业 TWh	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
发电厂和 专业热电厂的自用量 ¹	14.1	13.5	13.4	14	14.3	14	13.8	12.5	14.20	13.88	12.24
自用量 专业供热厂	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.23	0.16	0.19
采矿业和 采掘业	8.8	8.7	8.7	8.5	8.3	8.3	8.2	7.9	8.16	7.89	7.85
工业与 建筑业	47.9	48.2	50	52.1	55	57.8	57.2	55.8	58.86	57.62	54.14
供水；污水处理和 处理	2.6	2.7	2.7	2.9	3	3.1	3.1	3.1	3.32	3.28	3.27
运输	4.1	4	4.3	4.6	5.2	5.6	5.6	5.3	5.72	5.92	6.40
小型 用户	68.6	70.9	71	73.9	73.1	74	72.9	72.4	73.51	74.71	71.07
总消耗量²	146.4	148.1	150.3	156.2	159.0	162.9	161.0	157.1	164.0	163.5	155.2
动态 消耗 平均 增长率	100.3%	101.2	101.5%	103.9%	101.8%	102.5%	98.8%	97.6%	104.4%	99.7%	94.9%
	100.6%										

来源：基于以下数据的自主研究：燃料和能源消耗（GUS）

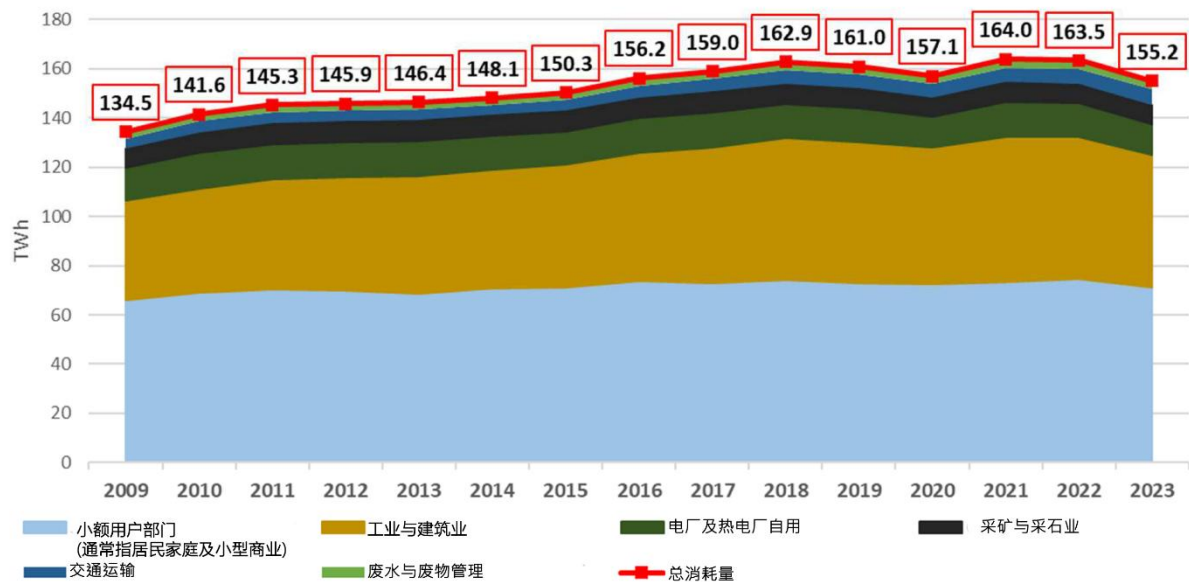


图2 2009-2023年波兰电力消耗

情况来源：根据波兰中央统计局（GUS）发布的《燃料和能源载体消耗量》数据自行编制

¹ 包括专业能源行业的供热锅炉

² 不包括归类于D类（PKD2007）实体的供暖和照明直接消耗量

电力消耗的持续增长正通过能源效率措施得到抵消，因此2023年消耗量将下降，自2009年以来观察到的增长趋势也将放缓。

从能源消耗结构来看，小用户领域占据主导地位（2023年占比45.8%）。工业和建筑业也具有高能耗特征（2023年占比34.9%）。发电厂和热电厂的自用能耗约占总能耗的7.9%。采矿业能耗略高于5%。能耗最低的是交通运输、供水和废物管理行业，分别占4.1%和2%。

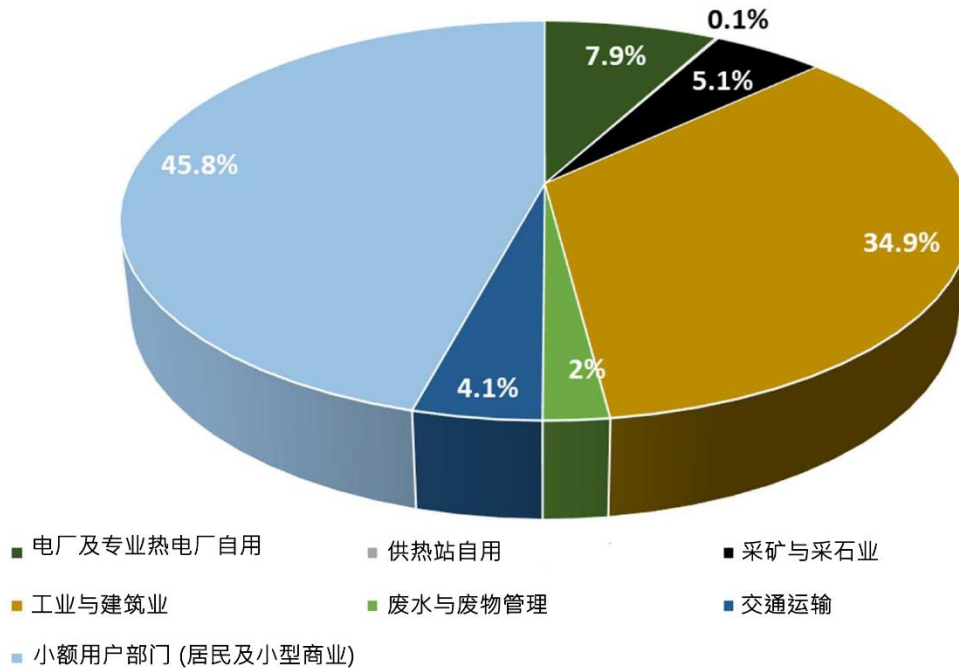


图3 2023年波兰电力消耗结构

来源：基于《2023年燃料与能源消耗》（波兰中央统计局）的自主研究

2019-2021年间电力消耗的下降也导致国内发电厂的电力产量减少。尽管全球局势动荡，过去十余年间波兰的电力产量仍呈现小幅增长趋势。根据分析时间段的长短，其年均值如下：

- 2022-2024年（最近3年）——平均增长2.8%
- 2019-2023年（5年）——平均增长率为0.1%
- 2014年至2023年（10年）——平均增长率为0.2%

2024年国内发电量达到166.99太瓦时，比2023年增长2%以上，同期用电量增长0.9%。因此，跨系统交换平衡约为2太瓦时的进口量。下图根据输电运营商PSE的数据，展示了2012年以来波兰电力需求和发电量的变化趋势。PSE公布的电力消耗量高于国家统计局（GUS）报告的数据，这可能是由于部分电力用户未向GUS申报所致。

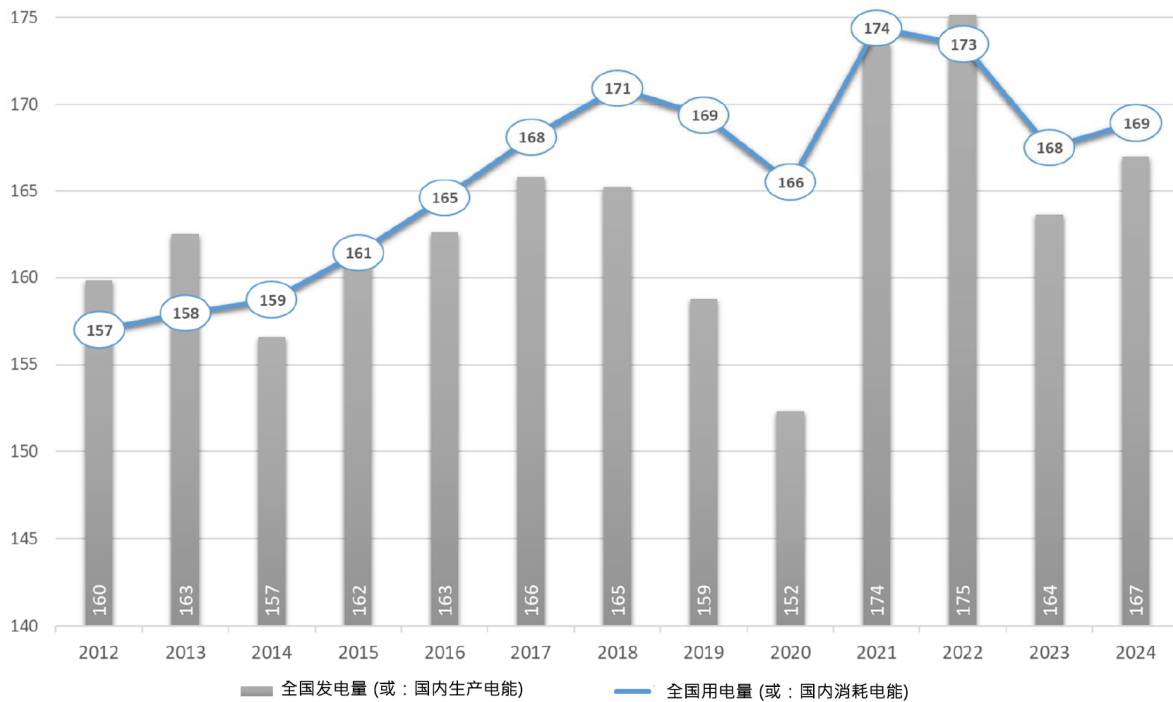


图4 波兰自2012年以来电力生产与消耗情况

来源：基于PSE数据的自主研究

下表展示了三个时间段的变化趋势，表明从长期来看，能源产量在最近几年呈现大幅波动的增长态势。历史能源消耗量在疫情爆发前持续增长，经过近年大幅波动后，目前又重新呈现上升趋势。

表2 2013-2024年期间选定时段能源生产与消耗的平均变化率

PSE数据	最近3年	最近5年	10年
能源生产	-1.2%	+1.3%	+0.8%
能源消耗	-1.0%	+/-0%	+0.7%

在波兰的电力生产中，燃烧硬煤和褐煤的能源占最大份额。然而，由于可再生能源发电量的增长，这些能源的份额逐年下降。此外，近年来，取代煤炭能源的新天然气发电机组也增加了其在电力生产中的份额。水力发电厂与工业热电厂的发电份额保持稳定。

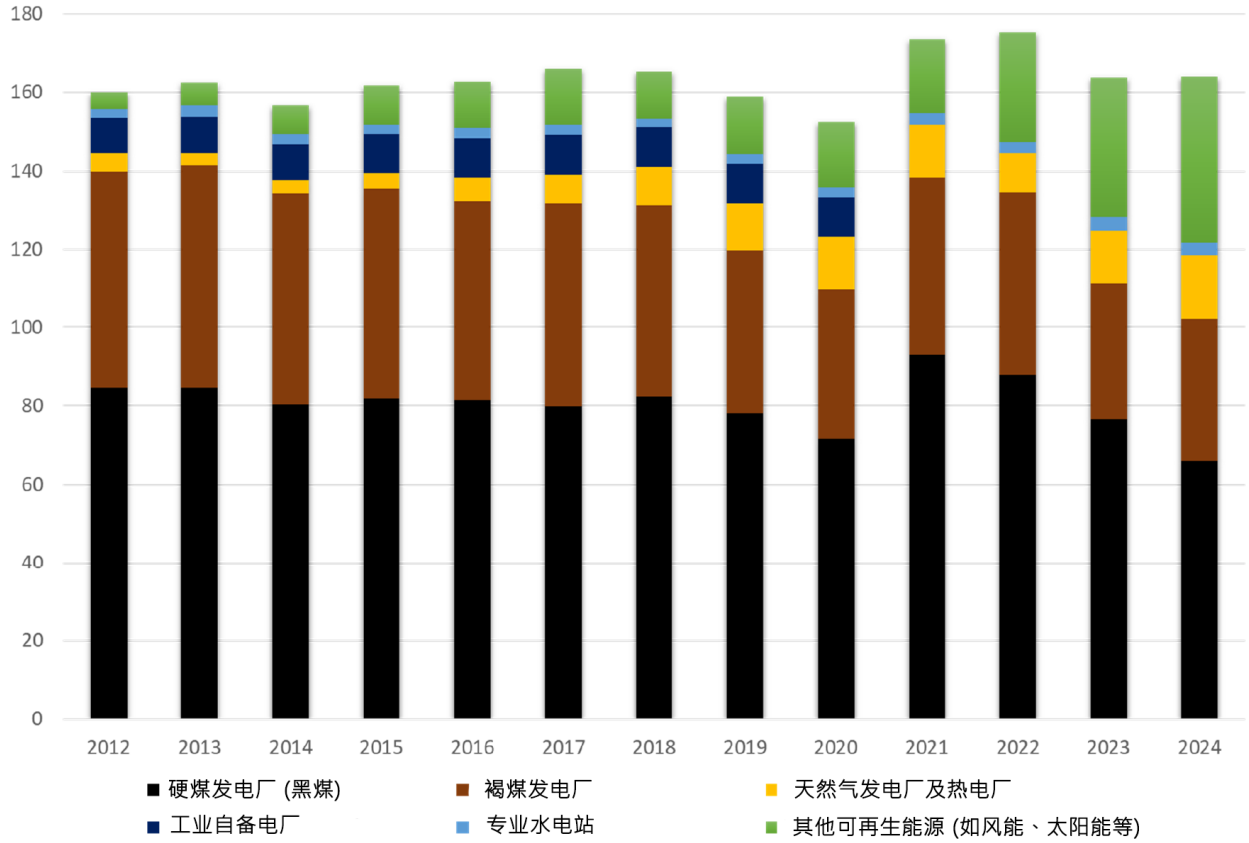


图5 自2012年以来波兰电力生产结构

来源：基于PSE和ARE数据（自2019年起）的自主研究

2.1.2. 年国家电网系统装机容量结构

目前，波兰的能源结构主要依赖于煤炭，包括硬煤和褐煤。煤炭燃料主要在系统凝汽式机组以及工业和市政热电联产（热电联产）厂中燃烧。近年来装机容量的变化主要与可再生能源的增长有关。下图展示了近年来国家电网装机容量的变化情况。

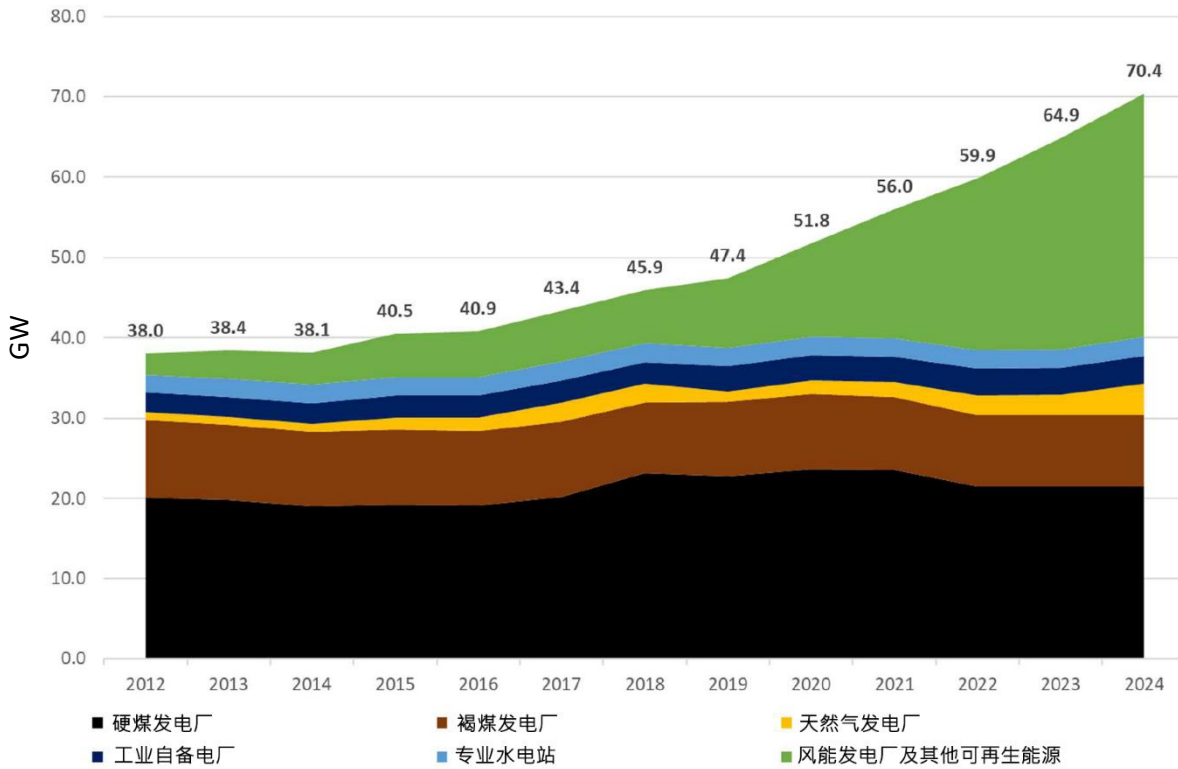


图6 近年来国家电网系统装机容量

来源：根据PSE和ARE数据（自2019年起）自行编制

对于新的常规发电源，近年来系统新增了以下燃气轮机联合循环机组：弗洛茨瓦夫——485兆瓦（2017年），普沃茨克——630兆瓦（2018年）；斯塔洛瓦沃伊——467兆瓦（2019年）；以及热兰热电厂——497兆瓦（2021年）。此外，2024年，下奥德河发电厂总计1400兆瓦的机组投入运营。

最近的非天然气常规投资项目包括2019年在奥波莱投产的两台机组，总装机容量1800兆瓦，以及几年后在雅沃尔尼投产的900兆瓦机组。

尽管上述新机组已投入运行，但由于国家电网系统中其余机组的运行年限较长，波兰能源行业仍不属于最年轻的行业。其中绝大多数机组运行年限在40至50年之间，另有十余台机组已超过50年。波兰发电机组的平均使用年限超过37年。

在波兰可再生能源领域，电力主要来自风能、水能、固体生物质能、生物气、液体生物燃料以及太阳能。地热资源主要应用于供热系统（供热行业）。

近年来，太阳能资源发展迅猛，尤其在产消领域——家庭光伏装置方面。

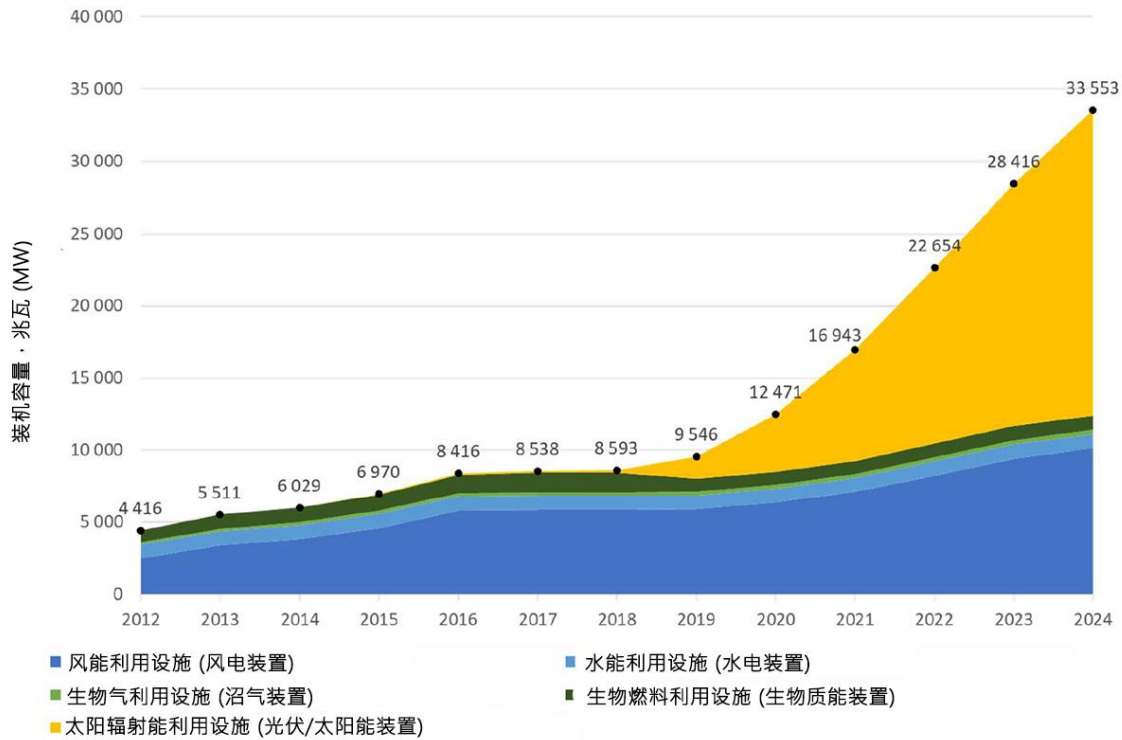


图7 可再生能源的装机容量

来源：基于能源监管局和能源研究局数据的自主研究（自2019年起）

截至2024年底，波兰可再生能源的装机容量超过32.5吉瓦（据ARE数据）。其中太阳能装机容量最大，超过19吉瓦。其次是风力发电装机容量，超过10吉瓦。

2.2. 年波兰电力市场发展预测

以下市场发展预测是基于波兰电力系统公司（PSE）制定的《满足当前和未来电力需求的发展计划》³⁾、其他公开发布的电力市场运作报告，以及EPK在电力市场多年运营中积累的专业知识所制定的。

所列预测旨在指出该项目可在何种现实条件下实施，以及波兰能源转型进程可能如何展开。

2.2.1. 装机容量预测

随着能源生产领域脱碳进程的推进以及可再生能源的显著发展，波兰的能源结构将在未来数年发生变化。波兰大多数燃煤机组已相当陈旧，在能源结构中煤炭使用比例不断下降的情况下，对其进行现代化改造在经济上已无意义。

此外，燃煤机组的单位二氧化碳排放量（kgCO₂/kWh）最高，因此无法通过电力市场等渠道获得融资（目前燃煤机组可参与拍卖）RM仅限于2025年之前），金融市场（投资贷款），同时还具有高碳排放成本。广义上的分类法也排除了对这类能源的投资。

³⁾ 2025-2034年满足当前及未来电力需求的发展计划；波兰国家电网公司；2024年12月
<https://www.pse.pl/-/projekt-nowego-planu-rozwoju-sieci-przesylowej-na-lata-2025-2034-uzgodniony>

下表根据PSE报告⁴列出了燃煤机组的退役时间表（按硬煤和褐煤分类）——未来需重建这些发电能力，以维持系统中适当的可用发电容量水平。

图中标注了下奥德河核电站的机组，本报告将该电站作为第三代/第三代+反应堆的建设选址进行评估。根据波兰电力公司（PSE）在分析中提出的两种情景，基于2020至2021年期间的调查结果，波兰核电站机组可能停运的日期最迟为2036年底，该分析涉及下奥德河核电站5-8号机组的停运计划⁵。

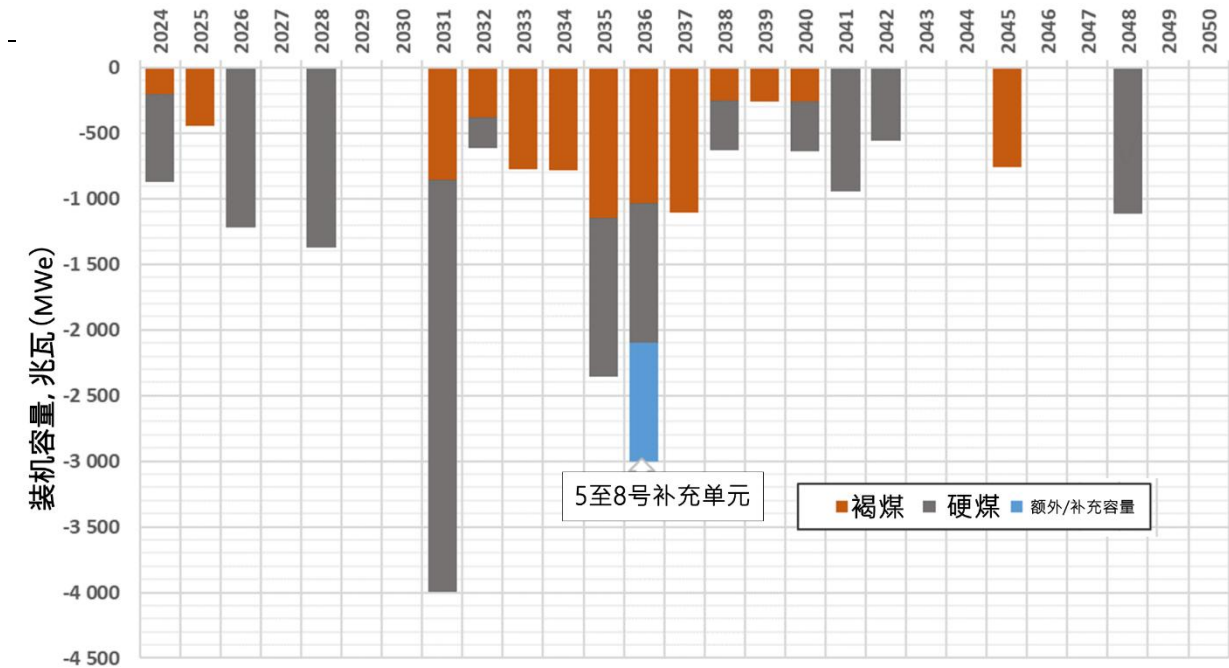


图8 参与中央平衡机制的燃煤机组停运时间表。截至年底的情况。

来源：根据PSE数据自行编制

在新增发电能力方面，计划建设新的燃气轮机发电机组，这些机组已在**电力市场拍卖**中申报，最近一次拍卖于2024年12月举行，供电期为2029年。下表汇总了在电力市场拍卖中中标的新燃气轮机，其中部分机组目前已进入建设后期阶段。

⁴ 2025-2034年满足当前及未来电力需求的发展计划；波兰国家电网公司；2024年12月

<https://www.pse.pl/-/projekt-nowego-planu-rozwoju-sieci-przesylowej-na-lata-2025-2034-uzgodniony>

⁵ <https://wysokienapiecie.pl/88275-polska-ma-szanse-na-utrzymanie-starych-weglowek-do-2028-r/> 25.03.

表3 电力市场拍卖中的燃气轮机

序号	电力供应商名称	地点	供电年份	容量 供电义务量 [MW]	期限 [年]
1	波兰能源集团 能源股份有限公司	下奥得河	2024	667.6	17
2	波兰能源集团 能源集团股份有限公司	下奥得河	2024	667.6	17
3	格鲁济茨联合循环燃气轮机发 电厂有限责任公司 有限责任公司	格鲁济兹	2026	518.4	17
4	PAK CCGT有限责任公司	亚当乌夫	2026	493.0	17
5	CCGT 奥斯特伦卡有限责任公司	奥斯特伦卡	2026	696.0	17
6	波兰能源集团 能源集团股份有限公司	里布尼茨	2027	794.6	17

核电站是能源结构中可替代煤炭的另一种能源。波兰当前的核能发展战略详见2020年10月发布的《波兰核能计划》。该计划设想从2033年起每两年新建一座核电机组，共计6座。总计将在两个地点建造两座核电站，每座各设3个机组。目前计划将第一座核电站建在波罗的海的卢比亚托沃-科帕林地区，并使用西屋公司生产的AP-1000反应堆。第二座电厂的选址目前尚未确定，正在考虑的地点包括科宁、贝尔恰图夫、波兰采和科济涅茨等地。

在波兰电力公司（PSE）制定的《2025-2034年满足当前及未来电力需求的发展计划》中，还规划了采用小型模块化反应堆（SMR）技术的较小规模核电机组。根据波兰电力公司报告，为确定未来发电结构，考虑了通过问卷调查从专业电力生产商处获得的信息。同时参考了战略文件中规定的海上风电场和核能发展计划。报告还参考了可再生能源拍卖结果、国内主要支持产消型能源的计划以及已完成的电力拍卖结果等信息。

PSE根据两种情景——SST情景（自由转型情景）和SDT情景（动态转型情景）——制定了电力生产预测结构，这两种情景的主要区别在于可再生能源和能源存储设施的装机容量。下表展示了PSE的分析结果。

表 4 2034 年电力生产资源结构

资源类型	SST情景 净功率 [MW]	SDT情景 净功率 [MW]
褐煤	4 401	
硬煤	6 317	
硬煤 - 峰值能源	2 277	
天然气	10 772	
生物质和生物气	2 830	
大型核能发电厂	1 146	2 292
小型模块化反应堆	560	840
水力发电	1 250	
抽水蓄能电站	2 462	
光伏发电	36 000	45 000
陆上风力发电厂	16 940	19 362
海上风力发电厂	10 900	11 885
能源存储设施	3 750	15 207
热电厂	5 217	

来源：2025-2034年输电网络发展规划，PSE

2.2.2. 电力能源需求预测

本节所示的国家电力系统长期能源需求预测由波兰电力系统公司⁶编制，考虑了以下因素：

- 历史趋势和最终能源消耗预测。
- 影响家庭、交通、工业和服务业能源消耗结构的宏观因素
- 能源效率领域的变化，
- 各行业国内生产总值增长预测。
- 技术和消费变化，以及欧盟指令要求波兰在最终能源消费中实现可再生能源目标所引发的变化，
- 最终能源消费结构的预期变化，包括电动汽车、热泵和燃料电池数量的增长。

该预测设定了两种情景，以应对国家电网环境的发展路径。第一种是自由转型情景，第二种是动态转型情景，后者预计能源需求将大幅增长。这些情景在以下图表中有所体现。两种情景都预测未来电力需求将增长。

⁶ 2025-2034年满足当前和未来电力需求的规划；PSE；2024年12月。

<https://www.pse.pl/-/projekt-nowego-planu-rozwoju-sieci-przesylowej-na-lata-2025-2034-uzgodniony>

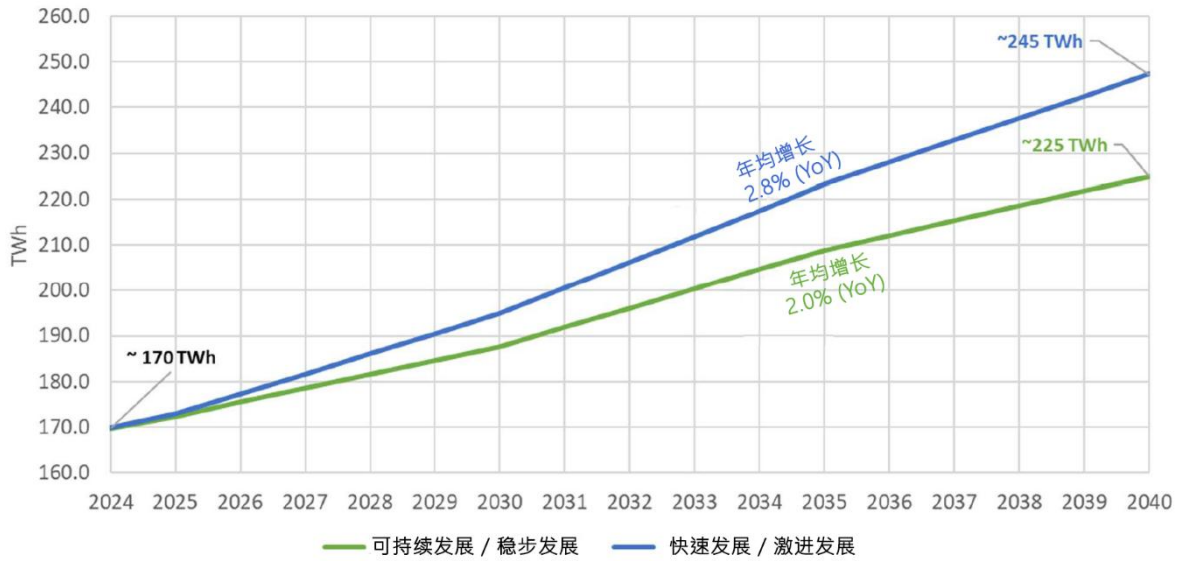


图9 2024-2040年预测年电力需求

来源：根据PSE数据自行编制

2.2.3. 发电资源充足性分析

根据PSE报告中提供的装机容量组合和预测电力需求，报告提出了发电资源充足性和电力系统安全性的分析结果。评估采用了两个电力系统可靠性指标：LOLE和EENS。

首个指标LOLE（预期负荷损失）指电力系统因系统（可用）功率不足而可能无法满足电力需求的年均小时数。该指标有助于输电系统运营商（PSE）评估国家电力系统的可靠性。其安全标准要求LOLE值不超过每年3小时（1982-2019年气候年平均值）。

在国际层面，LOLE是欧洲输电系统运营商网络（ENTSO-E）等组织在区域和全欧洲分析（如《中期供电充足性预测（MAF）》）中采用的报告标准。该标准可比较不同国家电力系统的可靠性，并识别能源平衡方面的潜在风险。LOLE也是分析可再生能源新来源（如海上风电场）实施情况的关键要素，因为这些能源的生产具有波动性，需要对电力需求和可用性进行精确评估。

第二个指标EENS（预期未供应电量）指因电力系统容量不足而无法向用户供应的电量（单位：GWh）。这是由于发电资源可用性不足或输电限制，预计全年可能中断供应的电量。

下表列出了PSE报告⁷中确定的LOLE和EENS平均值。

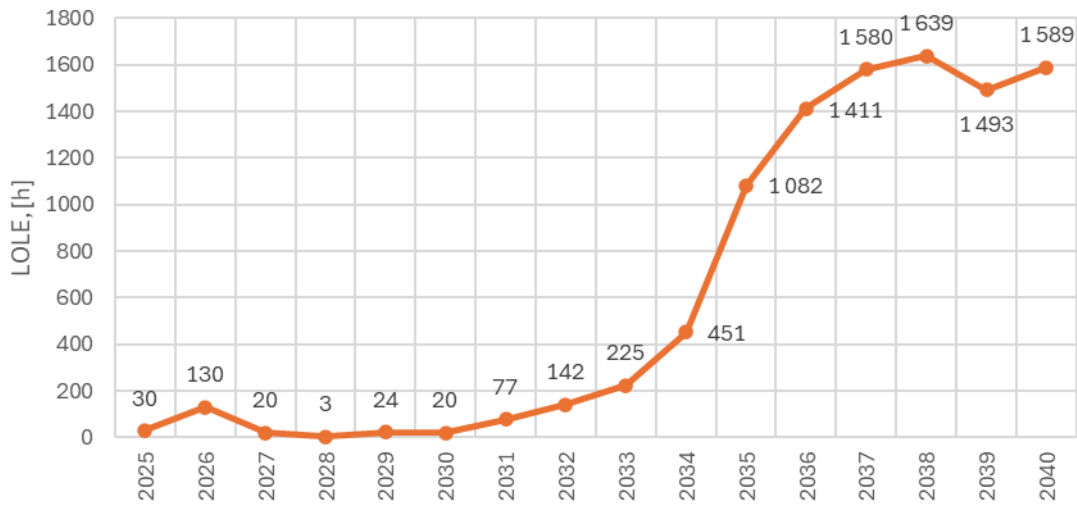


图10 2025–2040年LOLE指标平均值[小时/年]

来源：根据PSE报告自行编制

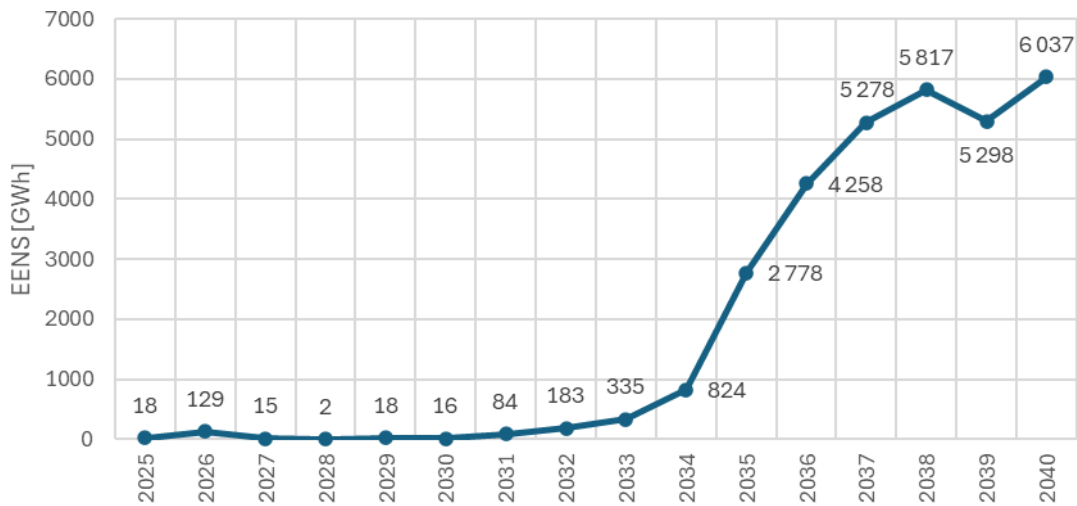


图11 2025-2040年EENS指标平均值[GWh/年]

来源：根据PSE报告自行编制

这两个指标在2026年已明显上升，随后下降，并在2030年后再次上升。在2035-2040年间，这些指标已比基准值高出数十倍。在研究期间，仅有一年的LOLE指标未超过预设的每年3小时。

2.2.4. 所需额外可用功率

在PSE报告中提出了一项解决方案，旨在将所列指标维持在最低水平（包括LOLE<3小时）。报告估算了为确保能源系统安全，当年需新增的备用容量。

⁷ 2025-2034年满足当前和未来电力需求的开发计划；PSE；2024年12月。

<https://www.pse.pl/-/projekt-nowego-planu-rozwoju-sieci-przesylowej-na-lata-2025-2034-uzgodniony>

表5 波兰国家电网所需额外净备用容量[兆瓦]

2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040
1 400	3 400	1 600	200	1 600	1 600	3 200	4 200	5 200	6 800	9 600	11 200	12 200	12 800	12 800	13 600

来源：根据PSE报告自行编制

到2026年，将需要额外增加3.4 GWe的净可用容量，而2030年后这一数值将继续攀升。到2040年，该数值将增长至原来的4倍（13.6 GW）。正如报告作者所指出的，需要注意的是，预计的额外容量可能因以下因素而更高：

- 国内能源转型速度加快——电力需求增长更快
- 未来气候条件——冬季更严寒、夏季日照减少
- 常规机组停运日期变更——早于报告预期，
- 新增发电能力投运日期变更——晚于报告预期。

此外，报告作者还提出了潜在的额外可用发电能力来源，包括：

- 新建燃气电厂（超出电力市场签约数量），
- 延长现有燃煤机组的使用寿命（包括延长其在2025年后的电力市场使用期限），
- 新型能源存储设施（采用不同技术）及配套的新可再生能源来源。
- 新建生物质能和生物气发电厂，
- 新型氢能与替代燃料技术，
- 额外的能源进口机会以及需求响应（DSR）服务的增长。除常规设备外，所提出的大多数解决方案很可能无法稳定满足需求，尤其是在大容量和持续供应方面。

2.3. 选择系统的最佳结构

基于波兰电力系统公司（PSE）提出的电力需求发展预测及能源结构预测，格利维采西里西亚理工大学的研究团队对波兰电力系统的结构进行了模型优化。

首先，针对两种电力需求发展情景，对2035年和2040年电力需求变化的每小时趋势进行了估算。下图展示了两情景下不同年份趋势的对比。

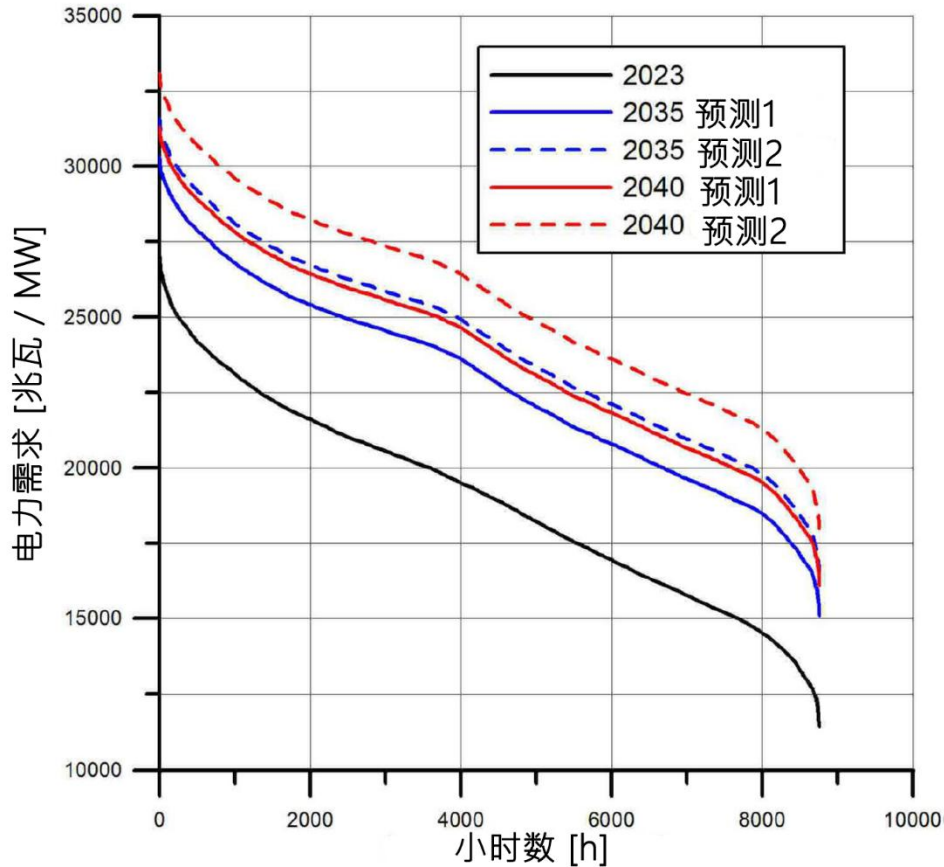


图12 2023年电力需求及2035年与2040年电力需求预测

来源：核能投资与国家能源安全专题报告；A. Rusin, A. Wojaczek, PŚ

第二步确定了两种情况下的预测能源结构：一种是核能（包括大型核电站和小型模块化反应堆）发展程度较高，另一种是发展程度较低。同时假设2040年将实现2034年动态转型情景中预测的可再生能源装机容量。此外，2040年后的能源结构中不包含燃煤机组，且假定不会新增燃气机组。当前阶段的能源结构未考虑能源存储设施，因为所需的能源存储功率和容量是本次优化的结果。

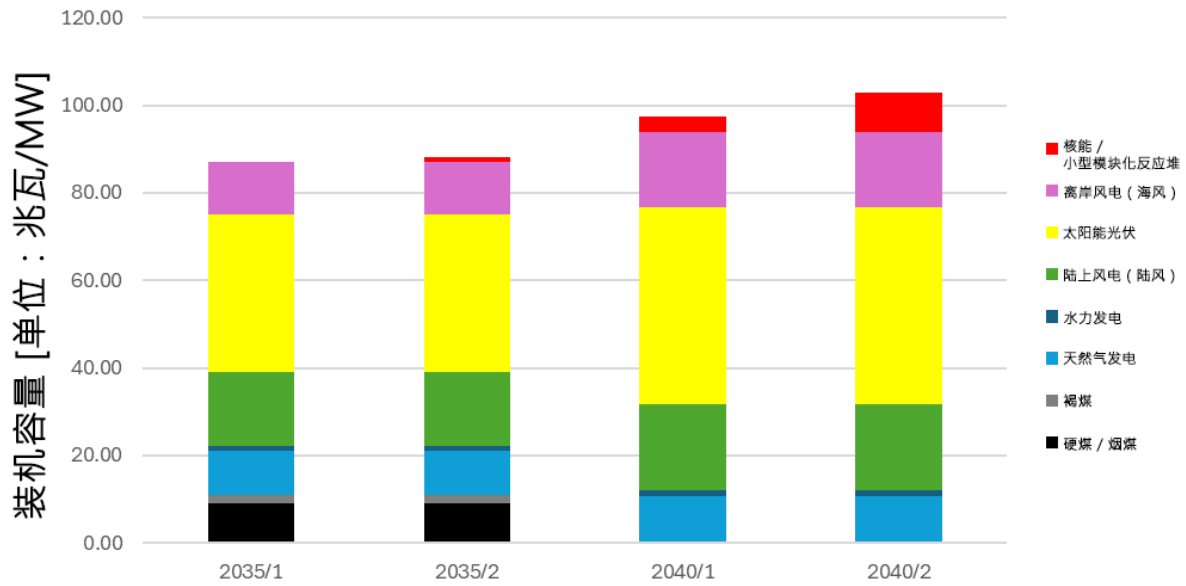


图13 2035年和2040年发电结构预测

来源：根据以下资料自行编制：核能投资与国家能源安全；
A. Rusin, A. Wojaczek, PŚ

针对系统中初步确定的电源结构及当年电力需求特征，选取了最优的储能容量及其功率，以确保该能源系统在储能设施的支持下能够满足所需的供电可靠性要求。该可靠性要求被设定为LOLE指标的极限值，即3小时/年。

表6 与既定结构能源系统协同工作的能源存储参数优化结果

年份/系统	需求预测	LOLE 初始值 [h]	储能容量 [MWh]	储能功率 [MW]	空仓储存时间 (小时) [h]	满储存时间 [h]	最终LOLE [h]	
2035/1	预测 1	30.5	7300	1400	65	7791	3.00	
2035/2	预测 2	156.1	16400	2900	104	7199	2.99	
2035/2	预测 1	42.4	8700	1600	72	7696	2.99	
2040/1	预测 2	811.6	220000	5600	5	4822	3.22	
2040/2	预测 1	3.7	仓库无需					
2040/2	预测2	90.5	11100	2000	72	7607	3.03	

来源：根据以下资料自行编制：核投资与国家能源安全；
A. Rusin, A. Wojaczek, PŚ

综上所述，要保持国家电网系统的可靠性，就必须在系统中配备与需求相匹配的稳定能源来源，而目前风能和太阳能尚无法完全替代这些能源。核电站配合燃气机组即可发挥这种作用。在可再生能源占比高的系统中，可再生能源占比高的系统中，必须由具备足够容量和功率的储能设施发挥重要稳定作用。

在上述新型能源设施及足够数量的能源存储设施建成并投入运行之前，仅有现有的燃煤机组和新建燃气机组能够确保能源系统的可靠运行。

2.4. 能源市场分析总结

- 分析当前电力市场状况，可以预见未来几十年电力需求将持续增长。因此，电力生产也应相应增加或维持在能够平衡系统需求的水平，同时结合能源进口或需求削减等措施。
- 所示的燃煤机组退役时间表表明，未来几年燃煤发电能力将大幅下降。此外，这些电厂大多已使用多年，难以延长其运行寿命。计划中的新燃气机组很可能无法完全替代燃煤发电。在多尔纳奥德拉地区，部分燃煤机组已被燃气蒸汽联合机组取代，其余老旧燃煤机组可能在2030年后停运。
- 鉴于当前电力生产行业的现状以及欧盟各国致力于实现零排放系统的目标，发展基于核能的新投资似乎是合理的。而二氧化碳排放量较低的燃气发电机组，在迈向零排放电力生产的过程中具有过渡性特征，欧盟也将对此进行强制执行（例如通过投资融资机制——排除化石燃料、分类法、碳足迹、关于可持续发展的报告要求，特别是CSRD指令等）。
- 可再生能源预计将大幅增长（根据PSE预测，到2034年光伏发电将超过30吉瓦），且其在电力销售方面享有“优先权”，这可能通过限制其在市场上的使用来阻碍大型传统发电机组的运行。即使考虑到电力存储系统的发展，仍可能需要可控发电机组来保障发电端能源安全，尤其是在保障波兰西北部供电的下奥得河地区。
- 根据西里西亚理工大学完成的SE优化方案，在缺乏稳定发电来源（如核能）的情况下，波兰电力系统要达到适当的能源安全水平（LOLE < 3小时/年），将需要容量极高的储能设施（甚至超过220 GWh），且需经历大量运行周期（这会影响储能设施的使用寿命）。
- 根据PSE的分析，若无额外备用容量，可能无法确保电力系统的安全水平，或将启动其他机制（需求侧响应、紧急能源进口），这些措施可能导致电力成本上升，或在紧急情况下引发大面积停电。

3. 针对现有设施基础设施的技术状况进行详细诊断，重点评估其用于核电机组建设的适用性，同时涵盖电站运行所需的必要基础设施，即输电网络、公路和铁路基础设施，以及外部和内部水源

3.1. 基本信息

下奥德河发电厂隶属于PGE集团旗下公司PGE传统能源与采矿股份有限公司，位于西波美拉尼亚省格里芬附近的新恰尔诺夫。该分公司的全称为“PGE Górnictwo i Energetyka Konwencjonalna S.A. – Oddział Elektrownia Dolna Odra”（波兰国家能源集团传统能源与采矿股份有限公司下奥德河发电厂分公司）。其主要业务是发电、输电和电力交易以及供热和热力输送。

3.1.1. 现有发电单位

下奥德河发电厂是一座燃煤热电厂。该厂曾运营八台200兆瓦级机组，这些机组于1974至1977年间陆续投入运行。根据《工业排放指令》的规定，2012-2020年间，1-4号机组被逐步退役，导致电力系统永久性损失约850兆瓦的发电能力，该缺口由图鲁夫电厂新建燃煤机组的发电能力所弥补。目前，该电厂拥有四台燃煤机组，总装机容量为908 MWe，热容量约为91 MW_t。该电厂作为“必须运行”单位，其运行受电网安全因素强制要求。

所有运行中及退役的发电机组（1至8号）均采用或曾采用开放式冷却系统，利用从奥得河取水冷却冷凝器。

目前，在PGE GiEK电厂附近区域，有两台总装机容量为683兆瓦的燃气机组处于启动/移交运营阶段。这些机组采用单轴系统，即所谓的燃气蒸汽联合循环机组（CCGT），由以下部件组成：

- 燃气轮机、
- 发电机、
- 回收锅炉、
- 凝汽式蒸汽轮机。

安装在多尔纳奥德拉发电厂的GE涡轮机设计上具有可扩展性，未来可相对轻松地改造为燃烧掺氢燃气。这将进一步降低二氧化碳排放强度。

3.1.2. 计划中的发电机组

将新发电源接入国家电力系统的能力将高度取决于发电源与电力消费者的地理分布、电网传输能力以及接入新发电机组的时间节点。本研究报告涉及在十年以上的时间范围内，将基于第三代核反应堆的新发电机组接入电力系统的问题。考虑到上述核能项目的时间安排，对本项目实施可能性的评估分析地点将受到当前计划实施的发电源的影响，这些发电源将在项目建成时与其形成竞争，同时还需考虑电网的输送能力。

根据《能源法》第7条第81款第1项规定，从事电力传输或分配的能源企业有义务编制以下信息：申请将额定电压高于1千伏的能源接入电网的实体信息，连接位置、连接功率、安装类型、连接条件颁发日期、电网连接协议签订日期以及供电开始日期。

所分析的项目地点直接位于重要的电网枢纽——克拉伊尼克变电站（SE）附近。目前计划接入克拉伊尼克变电站及其邻近变电站的发电源和储能设施（包括为该设施输送电力而预留的电网容量），以及配电网（拥有发电能力）将成为该项目在电网传输能力方面的主要竞争对手。根据波兰电网公司（PSE）——即计划实施该项目的区域内220千伏和400千伏输电网络运营商——公布的最新数据，在克拉伊尼克变电站及其周边区域计划建设以下发电和储能设施：

表7 计划接入输电网络的选定设施，连接至SE Krajnik及邻近变电站，根据错误！
无法找到引用来源。

序号	接入地点 (SE)	功率 [MW]	安装类型	交付/确定条款日期
1	路肩	340	光伏系统	2020.03.13
2	巴钦纳	39.96	光伏系统	2020.06.10
3	巴钦纳	25	光伏系统	2023.06.16
4	雷克瓦	60	光伏系统	2023.07.07
5	杜诺沃	499.98	光伏系统	2023.08.16
6	克拉伊尼克	245.2	配电系统	2020.05.14
7	路肩	245.2	分销系统	2023.04.21
8	巴钦纳	46	电力储能	2023.05.26
9	系统性分析	53.8	电力存储	2023.10.05
10	系统性巴钦纳	121.65	电力存储	2023.10.06
11	莫日钦	200	电力储存库	2023.10.11
12	克拉伊尼克	400	电力储能	2023.12.18

计划将总功率约为2.3吉瓦的设施接入克拉伊尼克发电厂及其周边电站，其中仅克拉伊尼克发电厂就接入约1.2吉瓦。

3.2. 最佳可用技术结论及相关燃煤机组计划停运

近年来，欧盟的煤炭发电量急剧下降，大多数成员国计划在2030年前逐步淘汰煤炭能源。从经济角度来看，煤炭作为能源在波兰将不再具有成本效益；例如，由于二氧化碳排放配额价格上涨和能源生产成本上升。

根据现行综合许可⁸⁾的规定，目前下奥德河发电厂仅有5-8号燃煤机组仍在运行。根据上述许可，涵盖上述燃煤机组的能源燃烧装置应自2021年7月18日起满足大型能源燃烧设施的最佳可用技术结论（即欧盟委员会执行决定2021/2326）的要求。

在上述针对这些机组的许可中，并未提及因未满足BAT结论要求而对设备给予豁免或将上述机组纳入许可范围。此外，该许可可为无限期许可。然而，鉴于需每八年更新一次BAT参考文件，预计对能源燃烧装置的要求将进行审查并可能趋严，尤其是在煤炭燃料方面。因此，科济涅茨运营的机组可能无法满足新的/更严格的BAT结论要求。考虑到上述机组的使用寿命，对其进行改造根本不划算。

2020年底，下奥德河发电厂关闭了1号和2号机组。根据现有数据，其余200兆瓦级5-8号机组目前尚未确定关闭日期。为确定其余机组的可能最终运行日期，采用了波兰电网公司（PSE）发布的下图。该图基于2020年至2021年期间的调查结果，展示了波兰核电厂机组在两种情景下的可能关闭日期⁹⁾。

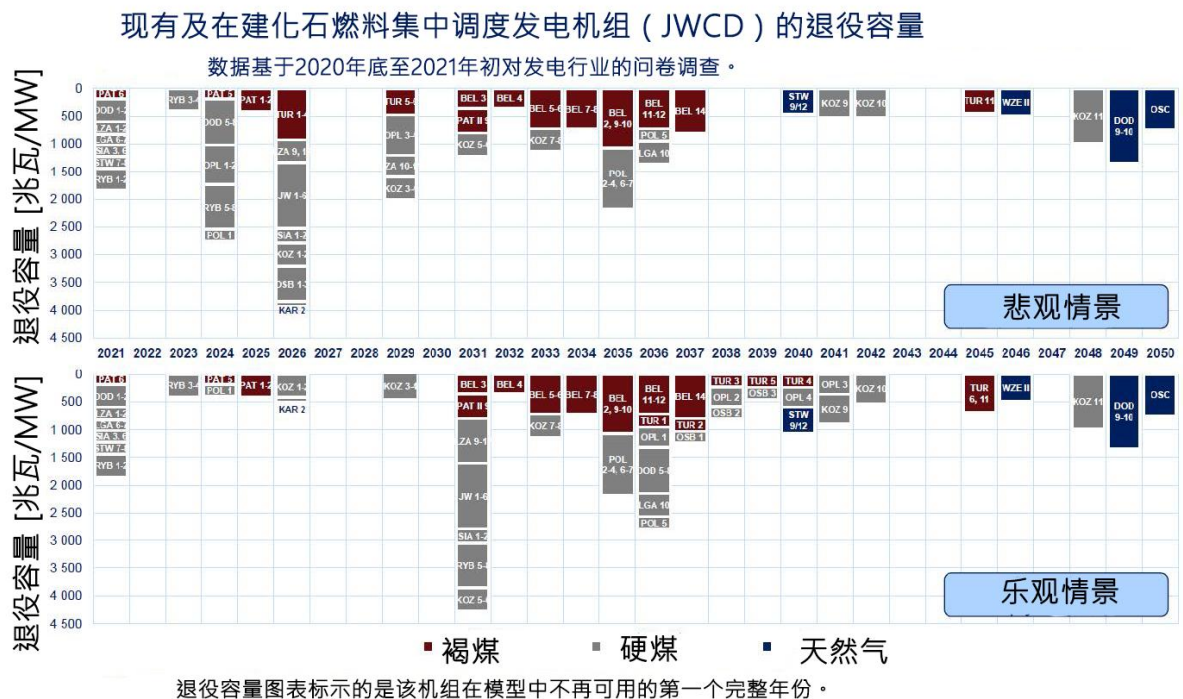


图14 退役机组装机容量

在悲观情景下，5-8号机组将于2024年底退役，而在乐观情景下，则将于2036年底退役。鉴于悲观情景假设机组将于2024年退役，波兰电力公司应在报告中提前作出相应安排

⁸⁾ <https://bip.wzp.pl/artykul/pge-gornictwo-i-energetyka-konwencjonalna-sa> - 2024年2月19日

⁹⁾ <https://wysokienapiecie.pl/88275-polska-ma-szanse-na-utrzymanie-starych-weglowek-do-2028-r/> 2024年3月25日

关于KSE发电资源的信息，应发布计划停运的通知。由于未提供5-8号机组的相关信息，故认为悲观情景已不适用。

假设多尔纳奥德拉核电站5-8号机组的计划停运日期最迟为2036年底。鉴于机组的使用年限，该日期似乎是最终期限。

3.3. 开放式冷却系统的特性及其在核电站中的应用

下奥德河电站的200兆瓦机组采用开放式冷却系统，冷却水由水泵抽入200兆瓦机组的泵房。在冷却水系统中，冬季可通过将加热后的水直接输送到泄洪室来加热地表水取水口。部分加热后的水流从排放室进入加热通道，防止取水口结冰。

下奥德河发电厂已获得综合许可，可从奥得河持续取水用于冷却，最大取水量约为63.4立方米/秒。目前，随着1至4号机组的退役，取水量已降至31.1立方米/秒。水通过明渠和东奥得河的地面取水口输送到泵站，然后通过泵系统和预处理装置（旋转筛和自清洁过滤器）进入涡轮冷凝器。从涡轮机LNP部分排出的蒸汽吸收热量后，加热的水进入排放渠道，离开冷却循环。加热后的冷却水直接进入热水渠道或间接进入东奥得河，离开冷却循环。

排放的冷却水温度不得超过最高允许温度35°C（该温度由环境限制决定），在不利的天气/水温条件下，这可能导致需要降低发电能力。

根据不同制造商的PWR型核电站机组平衡计算，从涡轮机到冷凝器的蒸汽出口速度最佳范围在150至300米/秒之间。涡轮机蒸汽出口速度取决于冷凝器中的压力（即真空度），而真空度直接与冷却水温度相关。为确保涡轮机蒸汽达到所需出口速度，决定真空度的冷却水温度不应超过24°C。

机组冷却循环旨在将发电机组产生的废热排放至大气中。该地点可采用两种冷却循环类型：开放式或封闭式系统。系统产生的热量将通过冷却塔（封闭式系统）或通过冷凝器流体冷却（开放式系统）排放至大气中。

下表对比了建造冷却塔与采用开放式冷却循环的优缺点：

表8 开放式冷却系统与冷却塔的对比

冷却塔	开放式冷却系统
高投资成本	无需投资——现有系统经改造后可使用
向环境排放噪音	无噪音排放
新设施	利用现有基础设施
需要补充系统	无需补充系统——流动冷却
建筑面积大	-

在冬季停机 and 最低负荷运行时可能出现的操作问题 冬季	冬季运行问题较少——管道保温能力强
不受河流水热条件影响 奥得河	夏季运行中存在重大问题 因水位可能下降
发电厂的发电能力不受外部条件（河流水温条件）的影响	冷却水温度可能超过极限值，导致发电功率降低
对奥得河水环境影响甚微： 河水未被加热	对奥得河水环境影响较大： 河水显著升温
对生物的吸入影响微乎其微——取水 仅用于补充系统	大量生物被吸入系统 (幼虫、鱼苗等)

为EPR核电站机组选择封闭式冷却系统，意味着要建造冷却塔。这是供应商为远离海边的设施首选和采用的解决方案。

3.4. 建筑部分和 道路

3.4.1. 现有规划开发方案说明

在多尔纳奥德拉核电站现有1-8号机组区域内，分布着多栋建筑、构筑物、道路及广场，这些设施直接或间接服务于生产目的（发电）。

鉴于所分析的新建第三代/第三代+反应堆发电机组的建设性质，位于多尔纳奥德拉电厂区域内的大多数技术建筑和构筑物均无法继续使用。为使新机组得以选址，需拆除大部分建筑结构及管网。本方案第5.4节提出了新建核电机组的拟建区域。拆除范围应涵盖1-8号机组及配套基础设施（锅炉房、机房、IOS、煤场等）。拆除工作完成后，在清除废墟和钢结构后，许多情况下需要对地基进行填充，使其与周边地形保持平整（宏观平整），或进行土地复垦（如煤场）。鉴于现有建筑的特性（深基础），预计许多情况下所需的大规模平整深度可能达到5米甚至更深，这将显著影响该任务的成本。

3.4.2. 现有 道路布局描述

通往多尔纳奥德拉发电厂的区域有两个入口大门。其示意性位置如图所示



图15 下奥德河发电厂入口布局¹⁰

电厂内设有厂内道路系统，包括人行道、停车场和堆放场。¹¹

下奥德河发电厂周边分布着公共道路网络，包括：国道和省道：

- 31号国道
- 省道121号
- 省级公路120号
- S3高速公路

及道路网络如图所示：

¹⁰ <https://www.geoportal.gov.pl/>

¹¹ <https://www.geoportal.gov.pl/>

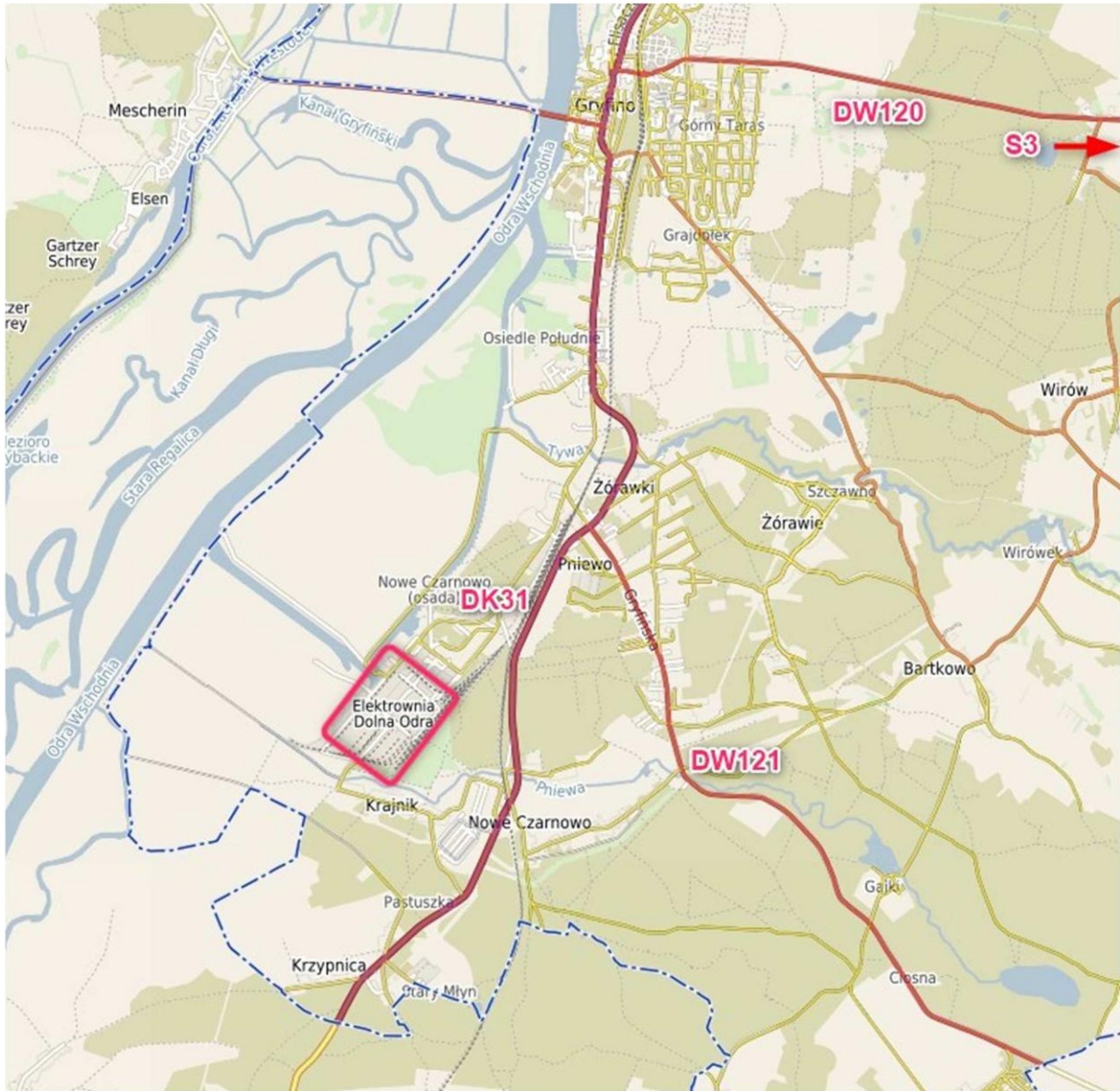


图16 下奥德河发电厂区域道路布局²

3.4.3. 现有铁路系统的描述

公共铁路线

273号铁路线：弗罗茨瓦夫中央站—什切青中央站（俗称奥得河沿线铁路、奥得河干线、Nadodrzancka）——连接弗罗茨瓦夫与什切青的西波兰铁路线，途经下布热格、沃沃夫、格洛格夫、新索尔、格林瑙、奥得河畔科斯特林和格里芬。该线路位于下西里西亚省、卢比什省和西波美拉尼亚省境内，以及波兰国家铁路公司（PKP PLK）在弗罗茨瓦夫、格林瑙和什切青的铁路设施区域。¹³

¹² <https://gryfino.e-mapa.net/>

¹³ https://pl.wikipedia.org/wiki/Linia_kolejowa_nr_273



图17 下奥德河发电厂区域国家铁路线示意图¹⁴

厂内铁路线

发电厂内设有铁路轨道系统，通过273号线路与波兰铁路系统相连

¹⁴ <http://mapa.plk-sa.pl/>

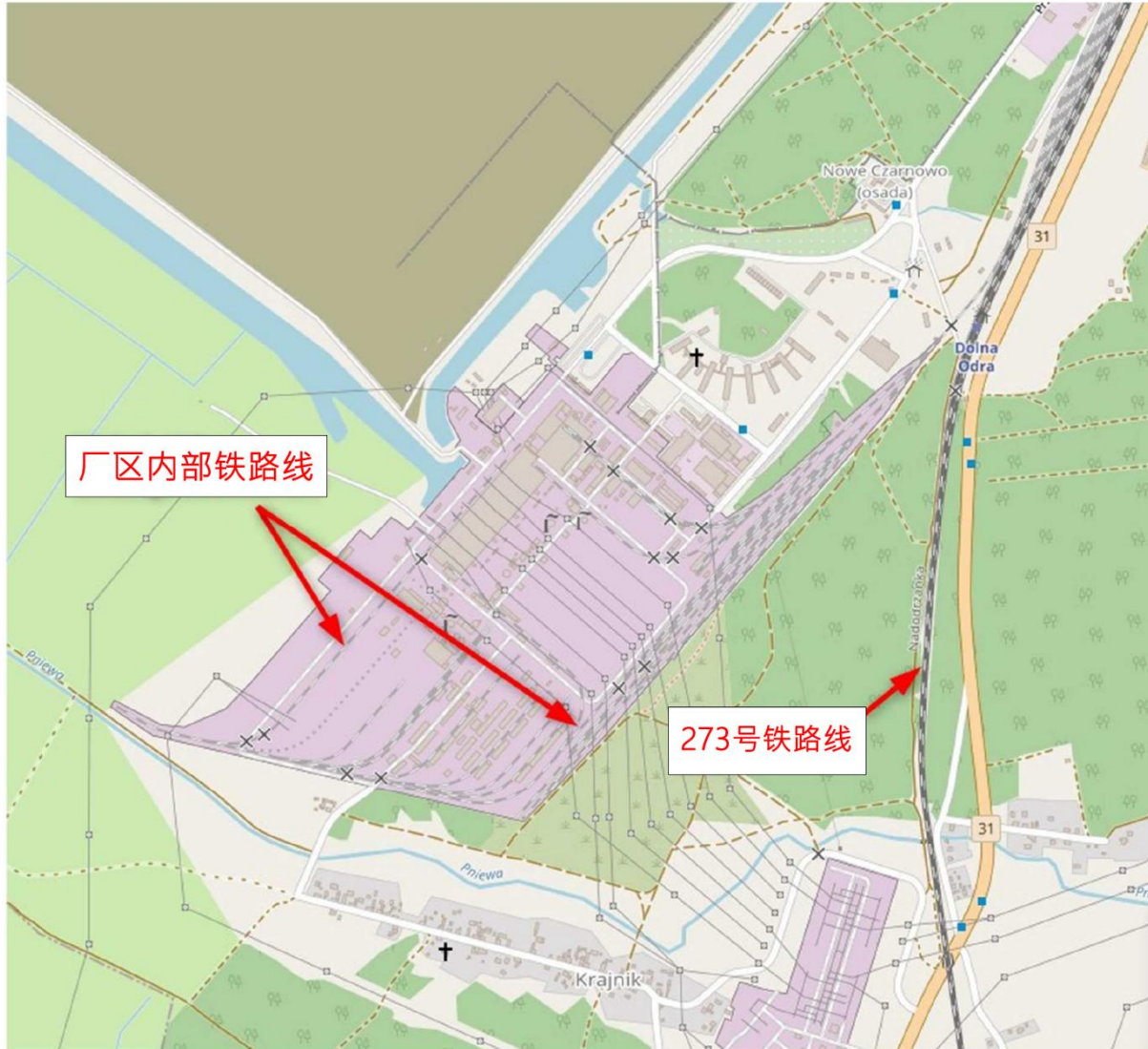


图18 下奥德河发电厂铁路线路示意图¹⁵

3.4.4. 地质条件与水文条件描述

地质条件

地质条件根据公开资料进行描述。¹⁶

下奥得河发电厂区域位于下奥得河流域内，涵盖东奥得河右岸。该区域属于低洼洪泛阶地，由未加固的堤坝堆筑而成。此区域是下奥得河谷的东部部分，形成于更新世时期。在河流沉积物中（深度约12米），沙质沉积物占主导地位。其下分布着沙砾层，深度在15.0至30.0米之间。地表覆盖着厚度为0.8至3.5米的人造沉积物（未加固堤坝），其形成与发电厂的建设有关。

¹⁵ <https://www.geoportal.gov.pl/>

¹⁶ <https://geologia.pgi.gov.pl>

研究孔洞不适用于下奥德河发电厂区域

洪水风险区域

下奥德河发电厂所在区域不属于洪水风险区（百年一遇）¹⁷。



图19 洪水风险区域¹⁸

¹⁷ <https://wody.isok.gov.pl/>

¹⁸ <https://wody.isok.gov.pl/>

3.5. 自用电力供应系统

3.6. 功率输出



1-8号机组通过位于机房墙壁沿线的三个三相机组变压器输出发电机功率。随后，电力通过悬挂在锅炉房屋顶固定电杆上的架空线路传输，再经由煤场广场的电杆输送到克拉伊尼克变电站。¹⁹ 机组线路穿越煤堆场，这目前构成重大问题，因其不符合现行法规要求。

2020年1月30日，签署了建造两座约700兆瓦燃气轮机发电机组的合同。²⁰ 正在建设的9号和10号燃气轮机机组将通过两台三相机组变压器（安装在锅炉房建筑内）输出发电机功率。随后，电力将通过架空线路输送到克拉伊尼克变电站。²¹

¹⁹ https://pl.wikipedia.org/wiki/Elektrownia_Dolna_Odra

²⁰ https://pl.wikipedia.org/wiki/Elektrownia_Dolna_Odra

²¹ <https://www.polimex-mostostal.pl/page/projekt-dolna-odra-0>

3.6.1. 总体特征

下表列出了B1-B11模块的总体特性，包括分配功率和功率输出系统的电压等级²²：

表9 B1-B11机组的总体特征

能源模块功率 [MW]									
1号机组 投入使用 1974年	2号机组 投入使用 1974年	3号机组 投入使用 1975年	4号机组 投入使用 1975年	5号机组 投入使用 1975年	6号楼 投入使用 1976年	7号楼 投入使用 1976年	8号楼 投入使用 1977年	9号机组	10号机组
222兆瓦 已退出 使用 12月31日 2020年	232兆瓦 已撤销 使用 12月31日 2020年	185兆瓦 撤销 使用 1月1日 2014年	205兆瓦 撤销 运行 12月11日 2012年	222兆瓦	222兆瓦	232兆瓦	232兆瓦	计划中 功率 额定 700兆瓦 - 投产 投入 4月30日 2024年 ²³	计划 功率 额定 700兆瓦 - 投入 投入使用 4月30日 2024
变电站电压等级 [kV]									
110kV	220kV	220kV	220kV	220kV	400千伏 在9号和10号机组 启动后，6号机组 的电力输出将维持 在 220kV	400kV	400kV	400kV	400kV

3.6.2. 块式变压器

1-8号机组的块式变压器为三相变压器，但鉴于其使用年限（1970年代）、功率和电压水平，在核电机组中的使用可能受到限制。9号和10号机组的块式变压器也将采用新一代三相变压器，能够适应新核电机组系统的运行要求。

3.6.3. 机组变压器前场



1-8号机组设有前场，其块状变压器位于冷却水通道一侧。前场仅配备部分设备（电流-电压互感器、接地装置及过电压限制器），这些设备位于设备区内。前场面积相对较小且狭窄，无法进行扩建。机组的电力通过架空线路输送到锅炉屋顶，然后输送到克拉伊尼克400/220千伏变电站（波兰电网公司所有）。

²² <https://zedolnaadra.pgegiek.pl/technika-i-technologie>

²³ <https://www.parkiet.com/surowce-i-paliwa/art39167891-gazowe-polaczenie-juz-jest-ale-nowa-elektrownia-w-dolnej-odrze-lapie-opoznienie>

3.6.4. 功率输电线路

输电线路是电力系统中专门用于从特定发电机组输送电力的组成部分。鉴于其功能定位，其技术参数无需为未来投资计划进行超规格设计。

现有的下奥德河发电厂输电线路用于输送仍在运行的5、7、8号机组的电力。6号机组的输电线路已从400千伏改建为220千伏。为计划投运的9、10号机组，将沿6号机组线路走向新建输电线路。¹

由于下奥德河电站的技术布局，部分机组的电力输出位置位于与克拉伊尼克变电站相反的一侧（该方案适用于同期建造的电站）。这导致机组线路必须绕过/跨越电站建筑物。

- 5号和6号机组的220千伏线路采用架空方式，架设于电厂建筑物和煤场上方。线路门架位于现有锅炉房建筑物的屋顶上。
- 7-10号机组400千伏电压的机组线路采用架空或架空-电缆混合方式，沿着下奥德拉发电厂与克拉伊尼克400/220千伏变电站之间的区域铺设。

由于建造时间的原因，5、7、8号机组的输电线路不符合当前架空线路设计规范的要求。

3.6.5. Krajnik变电站

SE Krajnik变电站位于Krajnik和Nowe Czarnowo市镇的Dolna Odra发电厂附近，用于从Dolna Odra发电厂输送电力，并进行400和220千伏电压的电力传输与分配，同时作为与德国电力系统的跨境连接点。该变电站由波兰国家电网公司（PSE S.A.）所有。

400/220千伏克拉伊尼克变电站建于上世纪70年代。现有的400千伏和220千伏开关设备在2014至2021年间进行了改造，符合现行法规的要求。

克拉伊尼克变电站是波兰国家电力系统的重要枢纽，尤其在保障什切青都市区及西北部地区能源安全方面具有关键作用。该变电站由两座开关站组成：220千伏和400千伏开关站，以及400/220千伏变压器。

- 400千伏开关站为架空开关站，采用1.5断路器配置，7个分支（预留2个分支空间）。
- 220千伏开关站为架空开关站，采用23位双系统配置，配备旁路母线。



图20 Krajnik 变电站

为扩建400千伏开关站，计划在220千伏开关站一侧预留用地。

根据2023-2032年满足当前和未来电力需求的开发计划，计划扩建400kV配电站，以连接和输出巴涅2号光伏电站（计划中的II.31位置）的电力。

该变电站（截至2032年）将通过6条400千伏线路与国家电网系统连接，其中包括两条向东延伸的线路（维拉登国际线路）、一条向东北延伸的线路（莫日钦至杜诺沃方向）以及三条向南延伸的线路（巴钦纳、戈尔兹沃方向），以及两条北向220千伏线路（“什切青环线”）。该电站与电力系统的紧密连接，一方面确保了通过该节点传输大量电力的良好潜力，另一方面，该电站向系统注入额外发电能力的潜力受到“宏观”北南向流量的限制-南向宏观电力流动所限，这些流动源于该国北部计划中的大规模发电（与南部传统能源的淘汰相关），以及从德国北部经波兰向南的国际电力流动。**错误！无法找到引用来源。**

3.6.6. 其他电力系统 技术

下奥德河电站与国家电网运营商 PSE 的系统建立了电信连接。在 PSE 与新核电站运营商之间满足正式要求后，这些系统可用于新机组。

3.7. 水务基础设施（除技术外）

下奥德河电站的水务基础设施（除技术设备外）主要包括厂内管网：

- 饮用水
- 消防用水——该系统由奥德河现有地表水取水口供水，
- 雨水和工业污水管道系统，包括机械污水处理厂以及上述污水排入奥得河的排放口（水力装置）；
- 生活污水管道系统，包括机械生物污水处理厂及上述污水排入奥得河的水利设施。

3.8. 对现有设施（）利用可能性的诊断总结

基于对现有基础设施的评估，假设在多尔纳奥德拉地区建设新一代III/III+核电站时将最大限度地利用现有基础设施，特别是内部和外部水源、输电网络以及公路和铁路基础设施，现对各领域作出初步诊断。

技术行业

在对多尔纳奥德拉核电站现有基础设施的技术状况进行分析后，发现现有1至8号机组唯一可利用的系统是冷却水取水与排放系统，包括取水口及取水预过滤设备。开放式冷却系统的其他组件（如泵站和管道）能否继续使用，主要取决于新核电站冷却系统的类型选择。

本可行性研究未涉及新型燃气轮机联合循环发电机组基础设施的使用问题，但从长期来看，可能存在此类需求。

安装行业

考虑到核电机组相关设施的新布局规划，应预留新建厂内管网系统：生活用水、消防用水及污水管网。因现有管网系统无法适应规划中的新用地布局。

在后续设计阶段，当用水需求和污水排放的所有定量及定性参数均已明确后，可考虑利用现有污水处理厂及污水排放口。然而，考虑到这些设备已运行多年，且其处理能力可能无法满足新设施的需求，该方案并不推荐。更应考虑新建污水处理设施，仅保留利用现有水务设备进行取水和排污的可能性。当然，这仅在设备在计划使用时的性能/处理能力及技术状态足够的前提下成立。

电力行业

5-8号机组现有电力基础设施的年龄和质量特征表明，无法将其用于本研究中分析的核电项目。现有的电力输出系统，包括：架空线路、电杆、支撑结构、机组变压器和分接变压器站以及机组自用电源系统，都将被拆除和拆除。

4. 投资过程中所需技术供应商的市场分析

4.1. 投资过程中

国家专业能源领域采用煤转核技术的脱碳计划，旨在运用第三代/第三代+核反应堆。该代反应堆具有诸多优势，包括：

- 反应堆建筑结构更简单、更坚固
- 大多采用基于自然现象的被动冷却系统，例如蒸发冷却
- 发生与堆芯熔毁相关的严重事故的可能性较低
- 即使发生堆芯熔毁事故，对社会和环境的影响也大大降低
- 反应堆建筑结构具有抵御大型飞机直接撞击的能力
- 延长燃料使用周期，提高燃料燃烧效率
- 减少放射性废物产生量使用寿命长达60年

4.2. 供应商市场

目前市场上有几种具体且成熟的该代反应堆技术。为进行进一步分析，选取了三种压水反应堆（PWR），即水压反应堆：

- **AP 1000**——由美国西屋公司制造的反应堆，净发电量为1150兆瓦
- **APR 1400**——由韩国水电核电公司（KHNP）制造的反应堆，净发电量1450兆瓦
- **EPR (1600)**——由法国电力公司（EDF）制造的反应堆，基于德国KONVOI反应堆和法国N4反应堆的经验，净发电量为1600兆瓦

AP1000——先进被动式——一种先进的轻水被动式反应堆，配备两个冷却回路，热功率为3415MWt。冷却回路配备主循环泵，直接安装在蒸汽发生器出口接头处，即循环回路的冷侧。这种设计消除了蒸汽发生器与泵之间的管道。

反应堆堆芯由157个燃料组件组成，采用七种类型燃料，均使用二氧化铀作为燃料材料。各燃料组件具有不同浓缩程度，可能含有以锆硼化物薄层形式存在的可燃烧毒物（二硼化锆）的薄层，以及由 $Al_2O_3B_4C$ 制成的特殊环形棒，共同实现堆芯功率的均匀分布。燃料更换间隔时间已延长至18个月，功率利用率约为93%。

AP1000反应堆采用完全被动式应急冷却系统，即该系统不配备水泵且无需应急电源（如柴油发电机组）。在冷却剂损失事故发生时，通过三种供水源确保向堆芯注入硼水：

- 两个冷却剂净化和补充系统储罐
- 两个由氮气垫维持在4.9兆帕压力的蓄能器
- 安全壳内的储罐，用于冷凝压力稳定器的蒸汽、接收停堆热量，并在堆芯熔毁时作为注水储罐用于淹没反应堆。

基于AP1000反应堆的核电站相比同等功率的低代核电机组，泵数量减少35%，安全相关管道减少80%，安全阀数量减少一半。大部分安全装置都位于由两层结构组成的安全壳内：内层为钢结构，外层为混凝土结构。内层钢结构安全壳旨在防止反应堆发生任何泄漏。安全壳上部设有容量约3000立方米的水箱，用于冷却内部钢制安全壳。

被动冷却系统旨在确保在事故发生后72小时内，无需操作员采取行动即可安全关闭反应堆。

堆芯熔毁概率估计低于 2.4×10^{-7} /年

APR1400——先进压水反应堆——先进的双回路水压反应堆，每个回路配备两条冷却线。APR1400反应堆由韩国电力公司（KEPCO）和韩国水电核电公司（KHNP）生产。

反应堆燃料系统由256个燃料箱组成，每个燃料箱装有236根燃料棒。燃料材料为二氧化铀（ UO_2 ），但部分燃料箱中掺入了氧化钆（ Gd_2O_3 ）作为燃烧性毒剂。该反应堆还可使用再处理的MOX燃料，其比例占基础燃料的33%。

主要安全系统包括堆芯应急注水系统、压力释放与蒸汽排放系统、安全壳喷淋系统以及应急给水系统。安全壳内还设有燃料装卸水池；紧急情况下，该水池中的水将用于堆芯注水。注水系统经过简化，配备四条冗余管线，可将水直接注入反应堆水箱，并配有双重电力供应系统。每条应急冷却管线均设有主动部分（使用水泵）和被动部分（冷却剂储罐和流量调节器）。

安全壳厚度约为1.37米，由压缩混凝土制成，内侧覆盖有防止泄漏的钢制涂层。该壳体还可承受0.3G加速度的地震。

反应堆堆芯损坏概率估计低于 10^{-5} /年，安全壳损坏概率低于 10^{-6} /年。

目前采用APR1400反应堆的核电机组包括新古里3、4、5和6号机组。

EPR——欧洲压水反应堆——是德法合作设计的最大型PWR反应堆，其最大发电功率约为1650兆瓦。

该反应堆的主要燃料是二氧化铀 (UO₂)，但也可使用含2%至8%钐的MOX燃料（含钐或不含钐）作为可燃的毒物。燃料包壳、间隔网和燃料管的制造采用了含锆和1%铌添加剂的M5合金。M5合金的应用提高了抗腐蚀性和抗蠕变性，并增强了尺寸稳定性。

EPR反应堆的创新之处在于采用了重型反射器，该装置可限制撞击容器壁的中子逃逸。这改善了中子管理，从而降低了燃料浓度度并延长了其在反应堆中的运行时间。据估计，其燃料成本可比其他在役PWR反应堆降低多达17%。

该反应器还具有更高的系统热力学效率，即约36-37%。通过反应器二次侧的高压力——7.72MPa实现了更高的效率。

EPR技术的安全壳由两层混凝土构成。它们包括反应堆、燃料储存库以及两座容纳最重要安全系统的建筑。该安全壳的设计能够承受大型客机的撞击。与其他第三代/第三代+反应堆一样，EPR反应堆在混凝土安全壳内部设有防止泄漏的钢制内衬。

安全系统由四个独立的应急堆芯注水系统和给水系统及其辅助设施组成。另一套安全系统是硼水池，在正常运行期间用于燃料装卸，而在事故期间作为堆芯（包括熔融堆芯）和安全壳的冷却水源。

表10 第三代/第三代+核电站对比表

系统/参数		AP1000	APR1400	EPR
总体特征				
反应堆类型		PWR	PWR	PWR
净电功率	MWe	1110	1450	1650
核心热功率	MWt	3415	4000	4500
效率	%	32.6	35.1	36
使用寿命	年	60	60	60
运行/在建机组数量	个	4/2	4/6	3/3
冷却回路（初级）				
回路数量	个	2	2	2
循环泵数量	个	4	4	4
最大水压	MPa	17.2	17.2	17.6
工作水压	MPa	15.51	15.51	15.5
进水口温度	°C	279.4	290.6	295.7
核心出口温度	°C	324.7	323.9	329.9
核心水温升幅	°C	45.3	33.3	34.2
进水温度	°C	226.7	232.2	230
冷却剂通过核心的流量	吨/秒	14.3	20.991	22.225
涡轮入口蒸汽温度	°C	272.8	285	293
汽轮机出口蒸汽压力	兆帕	5.79	6.9	7.72
蒸汽发生器蒸汽流量	千克/秒	1889	1130.8	2604

燃料盒特性				
燃料盒布局/网格		17x17	16x16	17x17
燃料棒数量	个	264	236	265
导管数量	件	25	20	24
芯部盒数量	个	157	241	241
控制棒数量	个	53 (黑色) 16 (灰色)	93	89 (黑色)
燃料盒长度 (冷态)	厘米	426.7	381	420
核心平均功率密度	兆瓦/立方米	109.7	100.9	94.6
燃料棒				
堆芯燃料棒数量	件	41448	56876	63865
单位长度平均功率密度	W/cm	187	183.8	163.4
燃料套管材料		ZIRLO	Zircaloy-4	M5
燃料棒				
燃料材料		UO ₂	UO ₂	UO ₂ 或 MOX
最高浓缩度	%	≤5	3.64	≤5
燃料在反应堆中的运行时间	月	18	≥18	18.24
反应堆储罐				
核心层内径	米	4.039	4.655	4.870
储罐壁厚	厘米	20.3	28.4	25
等效芯径	厘米	304	363	376.7

针对所分析的核反应堆，使用Thermoflow软件包中的STEAM PRO程序进行了热力学计算。所建立的热力学模型考虑了多项技术参数，这些参数在上述表格以及由格利维采西里西亚理工大学完成的第3号任务报告中均有呈现。此外，还采用了国际原子能机构（IAEA）提供的数据。

该模型主要考虑了核反应堆的蒸汽部分，未对反应堆进行详细分析，其参数是根据指导方针确定的。此外，在该阶段尚未确定冷却系统，为便于比较，所有模型均采用开放式系统，环境温度均为15°C。最终模型结果可能因冷却系统参数不同而与表中数据存在差异。

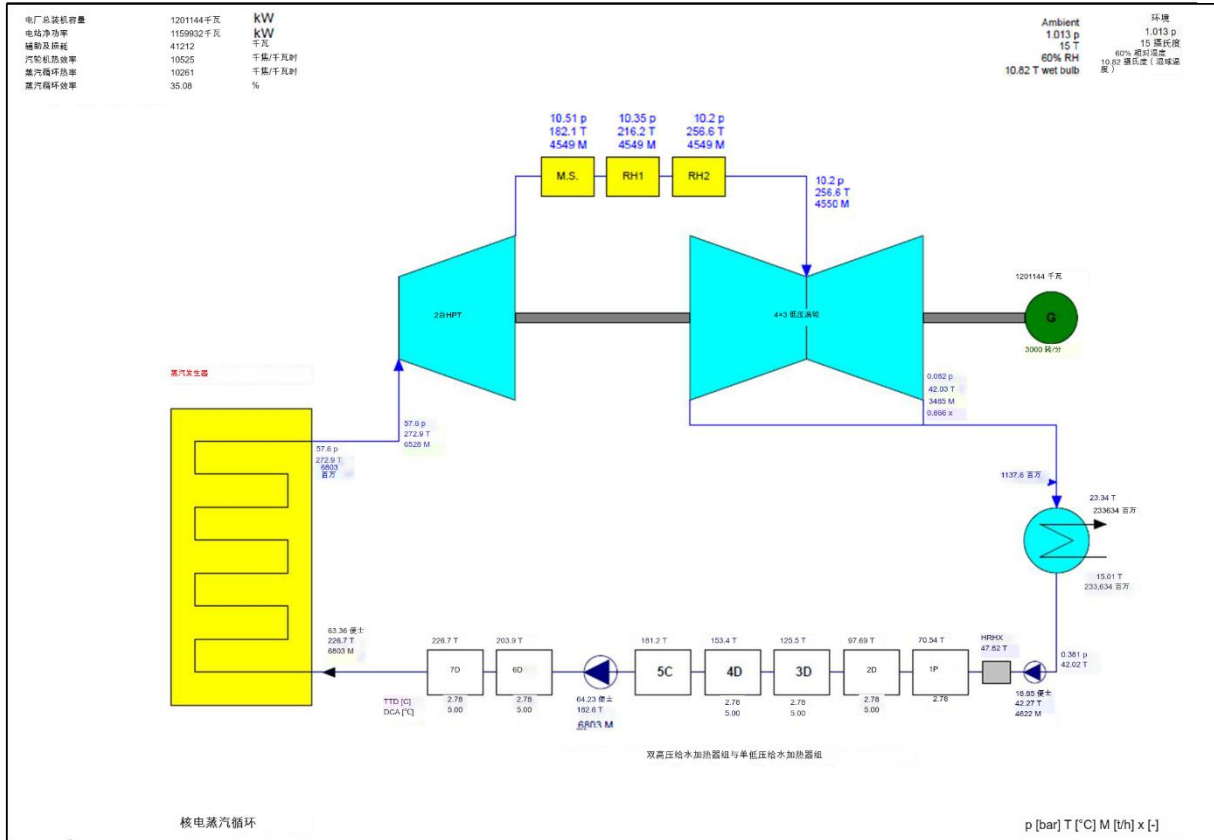


图21 AP-1000 机组蒸汽流程图

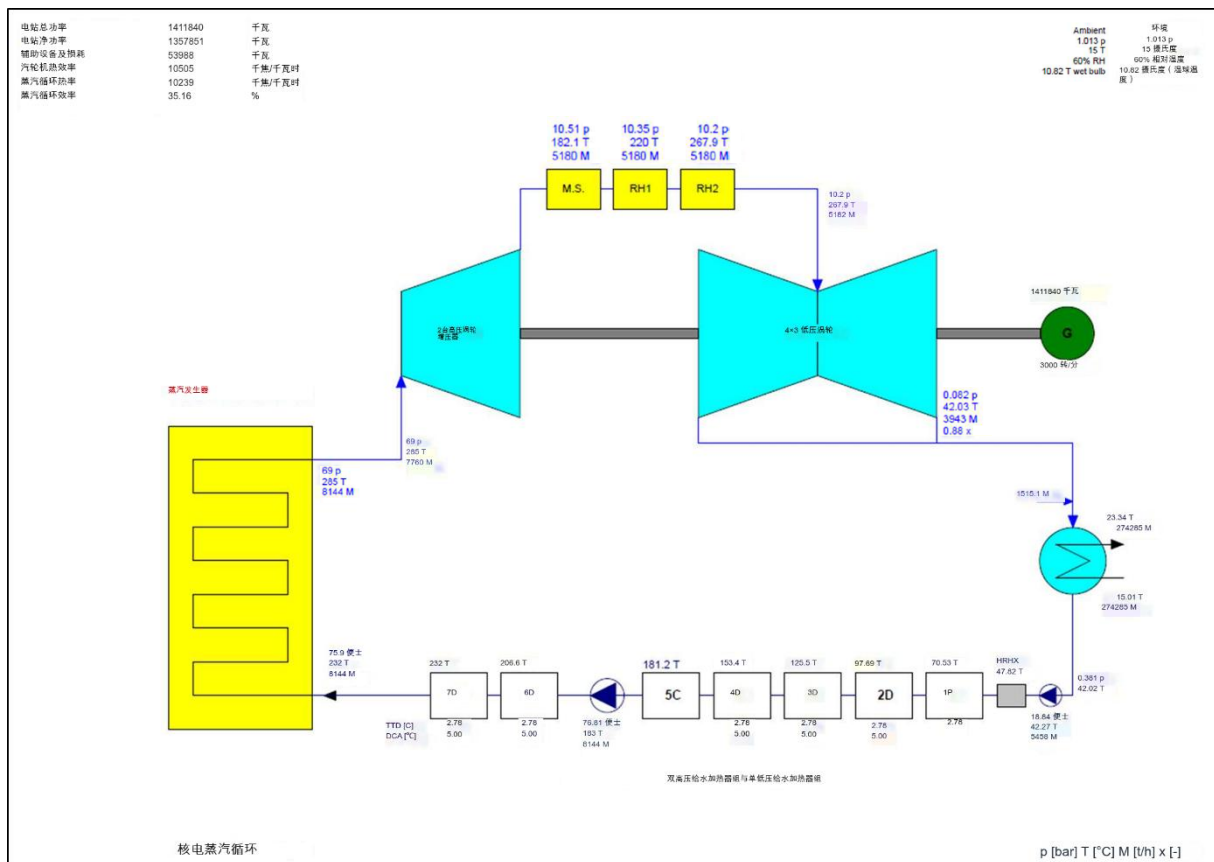


图22 APR-1400 机组蒸汽流程图

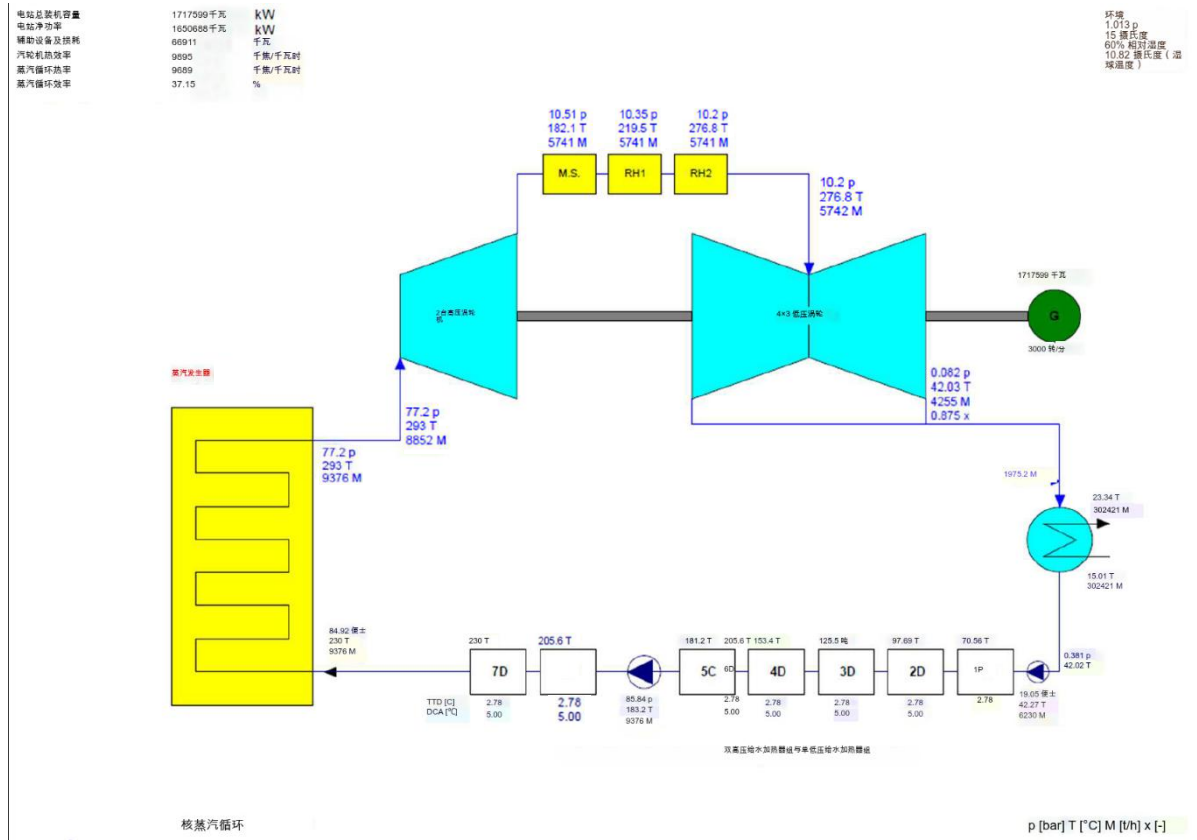


图23 EPR-1600 机组蒸汽系统示意图

4.3. 推荐用于进一步分析的反应堆（核电站）类型

基于对现有材料和获取数据的分析，确定后续工作将基于配备EPR反应堆的核电站技术。选择EPR核电站主要考虑了场地条件以及能够输出与拟替代的燃煤机组相当的电力输出水平。所有电厂建筑及专用冷却塔的总尺寸允许在该区域内建造一座EPR核电机组（1600兆瓦），同时保留必要的辅助设施、道路、安全区等基础设施。

5. 拆卸解决方案说明

5.1. 拆除工程的总体范围

该项目的前提是，在采用第三代/第三代+反应堆进行改造时，所涉核电站的主要技术部件均不保留。因此，拆除和拆解工作范围将涵盖200MW级机组的全部基础设施，仅有少数例外，如电力输出系统或冷却水系统的水工设备/建筑物，例如取水和排水渠道、吸水管和压力管道等。上述电力和水利基础设施可能需要改造或调整以满足要求，并确保核电站的安全运行。

下图标注了拟拆除并用于新建EPR型核电机组的燃煤电厂基础设施区域，以及用于新建燃气轮机联合循环发电机组的区域。

需拆除和/或腾出建设用地的200MW机组（1-8号）主要设施：

- 机组变压器
- 锅炉房
- 机房
- 废气排放系统（旋转式空气加热器、电除尘器、通风机、废气管道、烟囱）
- SCR氮氧化物减排装置
- 湿法脱硫装置，包括：
 - 带辅助风机的废气管道系统
 - 石灰浆制备系统
 - 吸收器
 - 石膏脱水系统
 - 废水处理系统
- 煤场和加煤系统

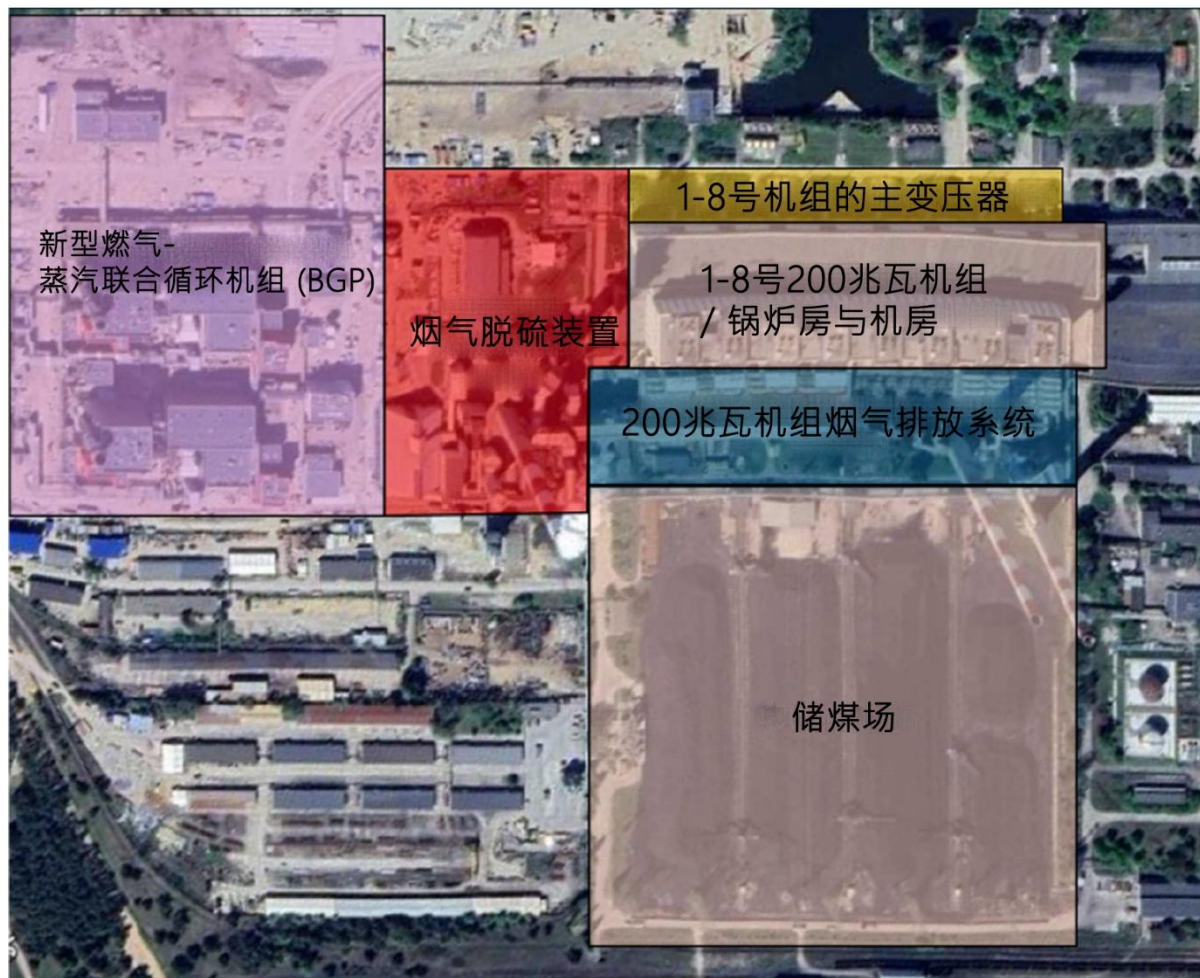


图24 燃煤电厂主要设施位置及新建BGP燃气轮机机组投资区域

5.2. 推荐用于进一步分析的冷却系统类型

根据第3.3节所述的冷却系统比较分析，出于安全考虑及减少环境影响，采用封闭式冷却系统并配备冷却塔是最佳方案。烟囱冷却塔建造的最大优势在于其不受河水热条件的影响，而在核电站通常60年的设计运行期内，这将确保机组稳定的冷却来源，从而保障电站和反应堆的安全运行。

此外，建造冷却塔将显著降低该设施对自然环境的影响，主要涉及奥得河以及受保护区域，如Natura 2000特别鸟类保护区"下奥得河谷"。

为补充核电站EPR机组冷却系统所需，从河流取水量约为5200立方米³/h，占现有取水流量（即31.7 m³/s）的4.6%，用于冷却现有的（正在运行的）四台200MW级燃煤机组。

5.3. 对现有开放式冷却系统的改造

采用封闭式冷却系统迫使必须改造现有的冷却水输送和排放系统。计划保留现有输送冷却水至取水口的管道。由于采用冷却塔导致取水量减少，必须在原水/河水取水口安装新水泵。计划为每个核电站机组配备配置为3x50%的新泵组。每台泵的产能约为260⁰立方米/小时。出于安全考虑，该系统可增设备用应急泵。新水泵的产能将取决于封闭冷却系统补水和脱盐的水需求，以及为制备去离子水和补充蒸汽发生器和涡轮机的蒸汽-水系统而取水的需求。冷却系统补水主要源于冷却塔中因蒸发和水滴飘散造成的水量损失。

由于脱盐工艺排放的水量较少，计划新建排放管道，并拆除/改造现有排放渠道，使其适应当前开放式冷却系统的水排放需求。

5.4. 建设区域

对于一个EPR核电机组，计划利用所有八个相邻的200MW级燃煤机组的基础设施。目前，运营商拥有四台正在运行的燃煤机组（5-8号机组）。

在核电站的主要组成部分中，我们区分出三个基本区域：核岛、带电力输出装置的汽轮岛以及一系列配套设施。



图25 EPR 核电机组主要设备布局

涡轮岛和机组核岛计划设在现有200MW机组的煤场区域。1÷6号机组锅炉岛和涡轮岛的区域计划用于新建冷却塔。拆除7号和8号机组以及带脱硫装置（IOS）的烟道系统后，剩余可用空间可用于新建水处理站（SUW）和组织施工后勤保障。电力输出系统及变压器应设置在铁路轨道一侧，以缩短至配电室的架空线路长度。

下图展示了EPR核反应堆主要部件的初步布局示例。

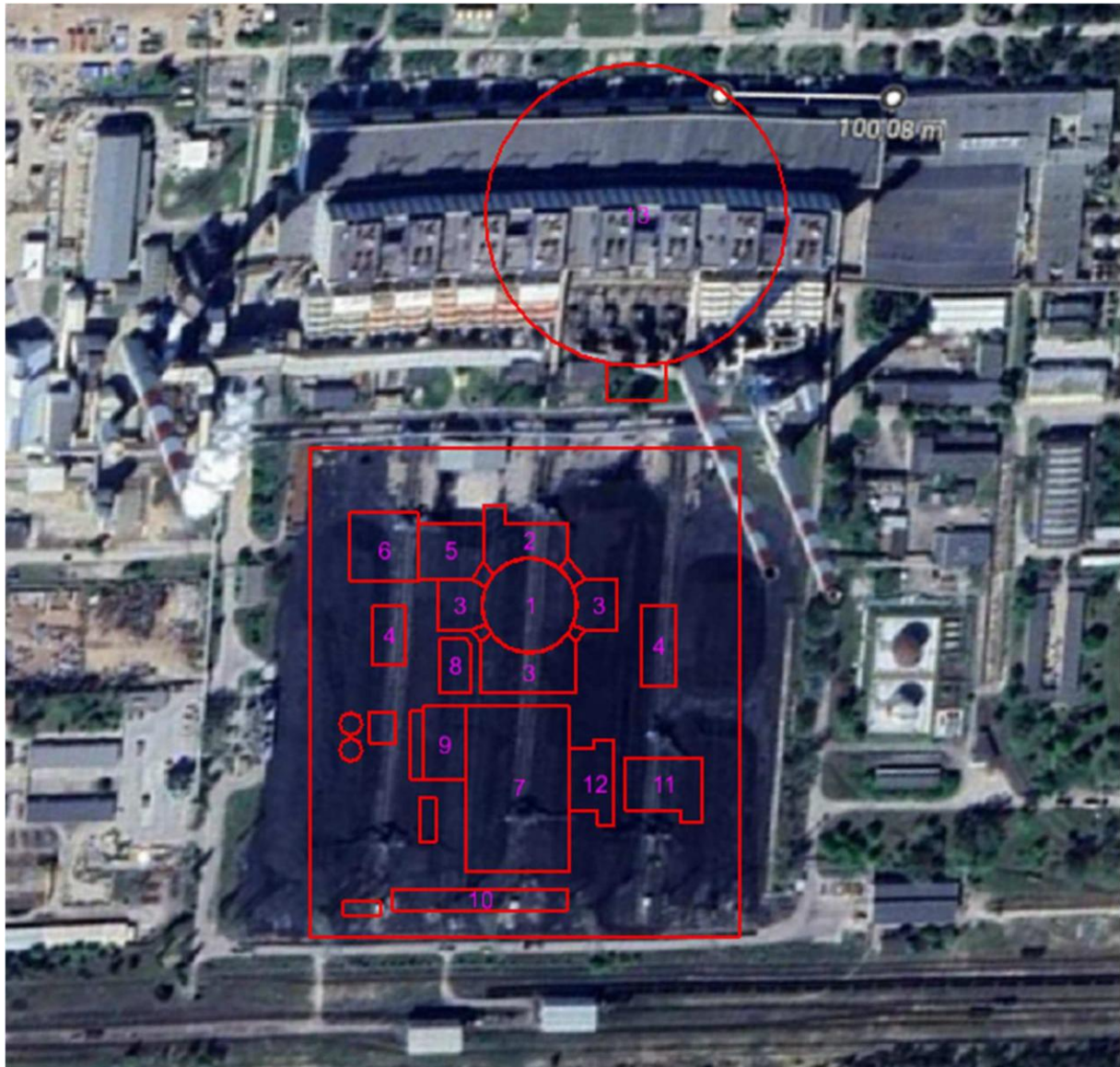


图26 下奥德河核电机组布局示意图

核电站的主要设施包括：

- 反应堆建筑（蒸汽供应系统和燃料补充水箱）（1）
- 燃料库（2）
- 安全系统建筑（3）
- 柴油发电机建筑（4）
- 辅助建筑（5）
- 放射性废物处理厂房（6）
- 涡轮机建筑（7）

电站其他设施：

- 通道建筑 (8)
- 电气楼 (9)
- 变压器系统 (10)
- 冷却水泵站 (11)
- 冷却水出口 (12)
- 冷却塔 (13)

位于核岛中心的反应堆建筑内设有核蒸汽供应系统的主要设备以及燃料补充水箱。其主要功能是在正常运行和紧急情况下保护环境免受内外威胁，并阻隔电离辐射。该建筑由带金属衬里的圆柱形高压混凝土壳体构成，外层包裹着钢筋混凝土外壳。这种结构确保了核电站能在任何条件下安全运行。

燃料库与反应堆建筑及安全系统建筑共用同一基础板。该建筑内储存着新鲜燃料、乏燃料及相关设施操作设备。出于安全考虑，低放射性区域与高放射性区域相互隔离。楼上设有燃料池冷却系统、应急钻孔系统以及化学和体积控制系统。

配备安全系统的建筑物被划分为四个相互隔离的区域，其中设有安全注射系统、应急供水系统及其辅助系统等防护装置。安全注入系统与余热清除系统相连。它们位于内部受辐射控制的区域，而相应的部件冷却系统和应急供水系统则安装在外部不受控制的区域。主控制室位于四栋建筑之一中。

配备柴油发电机的建筑物与核岛建筑物保持一定距离，这确保了在主电源供电中断时，EPR设施能够获得安全可靠的应急电源。这些建筑物内设有四台应急柴油发电机及其配套支持系统。

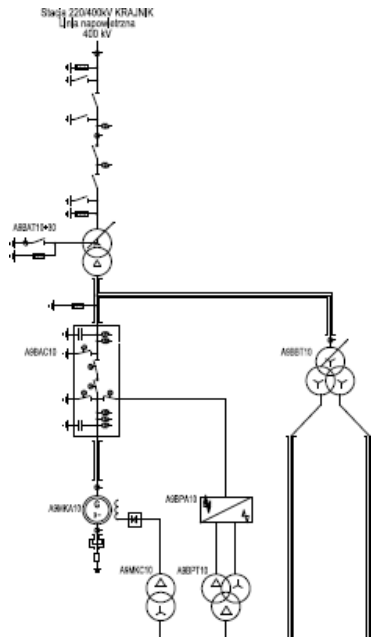
核辅助建筑的部分区域被设计为非辐射控制区，该区域内设有冷却水系统组件。专用采样实验室位于最低层。维护区及部分燃料装载阶段使用的运输区域则设置在最高层。所有来自辐射控制区域的排气均在辅助核建筑内进行引导、收集和分析，然后通过烟囱排放。

废物处理厂用于收集、储存和处理液态及固态放射性废物，具体包括：

- 将受污染的服装运往厂外进行处理
- 处理和包装干废物
- 化学废物处理
- 接收和储存空废物容器

涡轮机建筑内设有蒸汽-冷凝水-给水系统所有主要部件。具体包括涡轮机、发电机组、冷凝器及其辅助系统。

5.6. 功率输出



功率输出通过母线系统实现 至 发电机断路器（例如ABB公司的HEC型），然后通过母线桥接至配备三相块状变压器的前场。从变压器输出的电力将通过块状前场，以400kV电压通过架空线路输送至SE Krajnik。

将机组电力输送至国家电网系统（KSE）需向输电系统运营商（OSP）获取接入条件，以实现机组并网。

5.6.1. 法律条件

根据现行《能源法》（Journal of Laws 2024.0.266），申请并网的实体必须向能源企业提交申请，以确定并网条件（以下简称“并网条件”），该申请应提交至拟接入的电网所属能源企业，并附上相关文件及预付接入费，金额为申请书中规定的接入功率每千瓦30兹罗提。预付款金额不得高于预计的电网连接费，且不得超过3,000,000兹罗提。

对于直接连接到额定电压高于1千伏的电力网络的设备、装置或网络，应编制这些设备、装置或网络对电力系统影响的专家评估报告。

从事输电业务的电力企业有义务与申请接入电网的实体签订接入协议。

接入条款将规定双方的投资义务，包括技术参数、产权边界以及电力结算方案。

如果能源企业拒绝签订并网协议，则必须立即将拒绝决定及拒绝理由通知能源监管局局长和相关主体。

新建核电机组将被归类为D类发电机组（功率超过75兆瓦，接入电压超过110千伏）。

2024年法律公报 第412项 (Journal of Laws 2024, item 412)

公告
波兰共和国众议院议长

2024年2月26日发布

关于公布《核能设施及配套投资准备与实施法》统一文本的公告

发电机组并网要求由《网络法典》规定（欧盟委员会2016年4月14日第2016/631号条例，确立发电机组并网要求网络法典（英文：Network Code Requirements for Generators - NC RfG）

5.6.2. 型块状变压器

鉴于发电厂的位置，存在交付和安装三相单元的潜在可能性（允许使用单相单元）。为防故障，建议在备用位置设置备用单元。若使用三相变压器，则需配备三相单元；若使用单相单元，则需配备单相单元。

5.6.3. 型块状变压器的前场

为满足电力输出和与国家电网系统（KSE）协同工作的需求，建议建造电力输出变压器前场。

下图展示了模块化场站的拓扑结构示例：

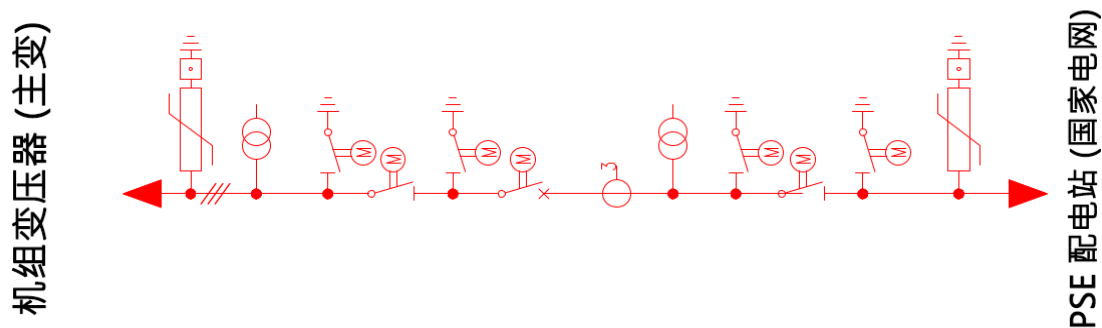


图27 块域拓扑结构示例

块场设备配置方案

从块状变压器方向看，设备配置示例如下：

- 过电压限制器 - 电压互感器 - 带两个接地刀的隔离开关 - 断路器 - 电流互感器* - 电压互感器* - 带两个接地刀的隔离开关 - 过电压限制器

* 采用电流电压互感器（组合式）代替单独的电流互感器和电压互感器

5.6.4. 功率输出的输电线路

现有的架空线路已使用多年（9号和10号机组线路除外）。尽管定期进行检查和维护，但仍需考虑其严重老化问题。由于线路位置可能不符合电力输出要求，且在技术上无法满足电力输出需求。改变技术参数需要获得行政许可，并符合现行标准和环境保护法规的要求。预计不会将这些线路用于核电站的电力输出。

5.6.5. 变电站扩建工程（科津采）

5.4.4. 最近可接收所发电力的变电站是400/220千伏Krajnik变电站。该变电站现有基础设施可将新机组线路引入400千伏开关场。400/220千伏变电站的基础设施及结构部件已于2014-2021年期间完成改造。400千伏开关场具备技术扩建条件。

5.7. 选定电抗器的初步技术说明

EPR反应堆堆芯由241组燃料组件构成，配备快速停堆控制系统CRDM（控制棒驱动机构），并能实施多种燃料管理策略（如IN-OUT/OUT-IN），从而满足电力企业的需求。堆芯的关键特性及其运行条件使其在燃料管理周期的成本方面具有竞争力。此外，EPR堆芯还为可持续发展带来显著效益：

- 每单位能源（兆瓦时）的铀消耗量减少17%
- 每兆瓦时减少15%的长寿命锆系元素排放
- 在堆芯中使用MOX（混合 UO_2 - PuO_2 ）燃料组件具有显著的灵活性，这使得回收来自乏核燃料的钚成为可能。

燃料组件由包含核材料的燃料棒束组成。燃料棒及其周围的冷却剂是反应堆活性区中的关键元件。燃料组件的主要特性包括：

- 铀-235同位素的浓缩水平达到5%，这使得燃料组件能够实现高效燃烧。
- 选择M5材料（一种具有卓越抗腐蚀和抗水合（即水化）性能的锆基合金）作为衬里和结构材料，可确保更高的耐受性，并在高燃烧度下保持出色的尺寸稳定性。
- 间隔网结构设计，确保低流动阻力与高耐热性。
- 采用高效防飞溅装置，几乎完全消除了与燃料污染相关的故障。

EPR的设计基于现有PWR反应堆的演进，包含多项旨在预防潜在故障的改进措施：

反应堆压力容器 (RPV) 配备重质中子反射器，通过限制中子从堆芯泄漏来提高燃料利用效率，并保护反应堆压力容器免受老化和脆化影响。此外，它还确保了堆芯周围内部结构的机械性能得到提升：

- 通过高效冷却反射器来均匀分布结构内部应力，从而减轻负荷并避免变形；
- 在辐射最强的区域没有焊缝或螺栓等不连续性
- 减压负荷大幅下降

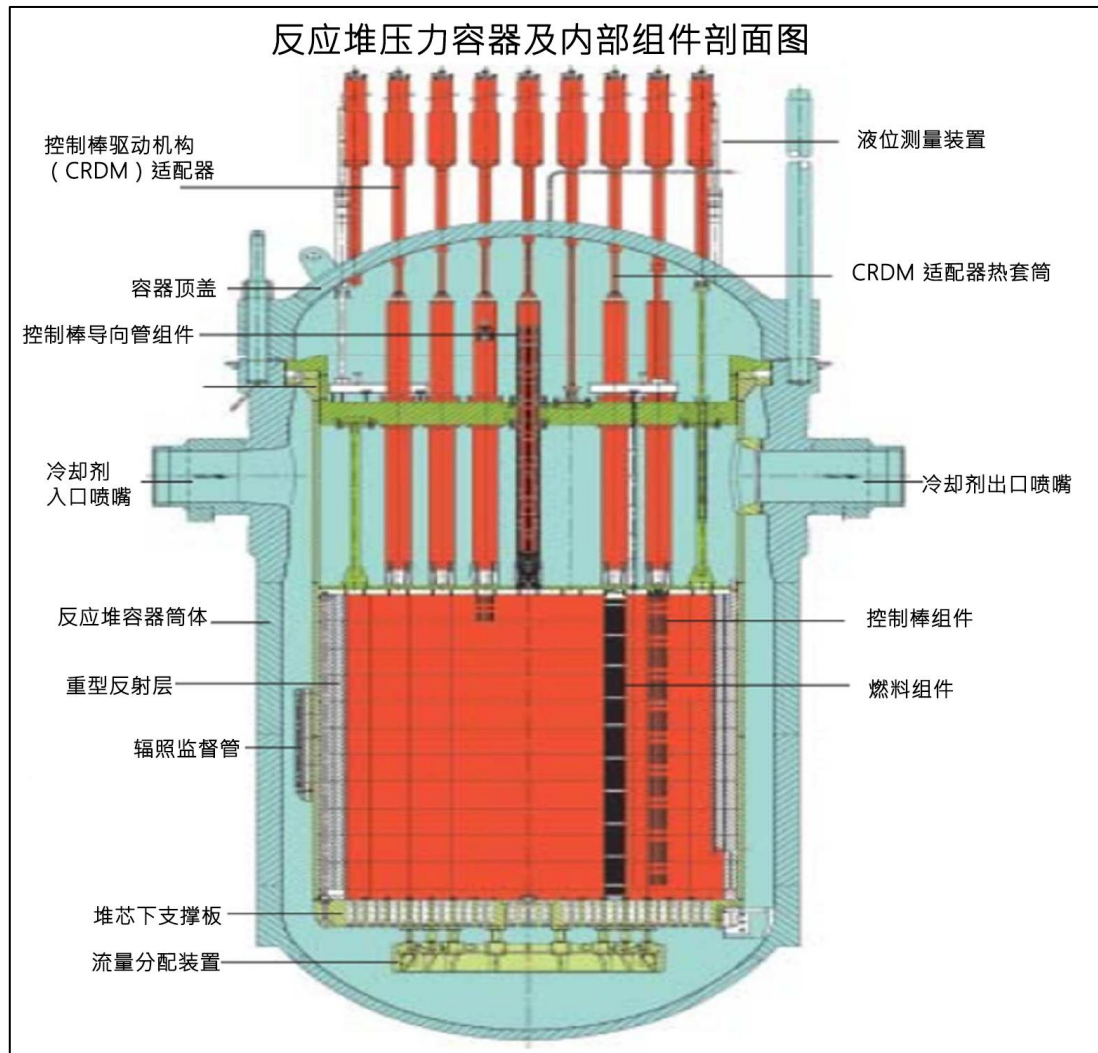


图28 反应堆建筑

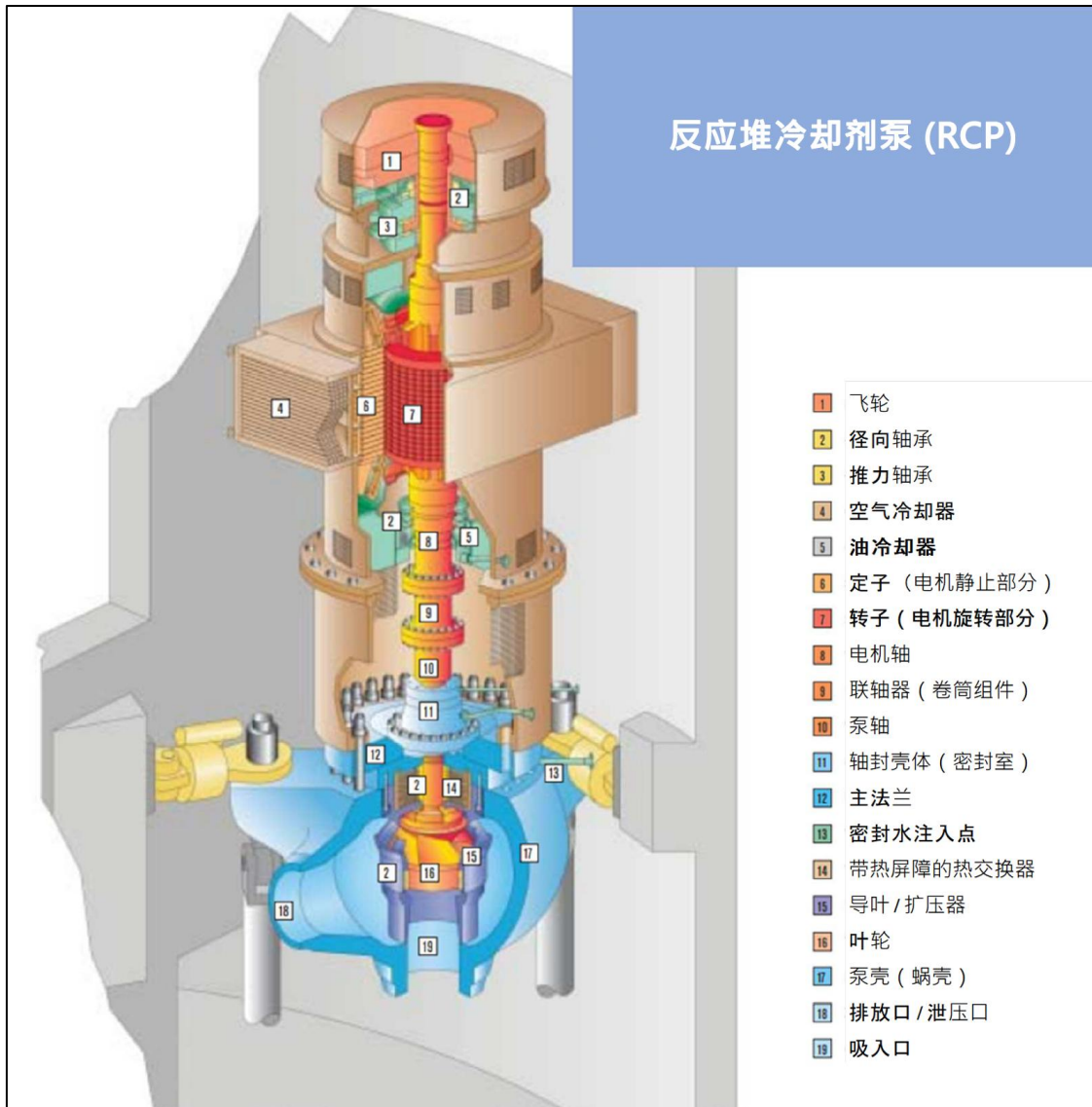
改进型蒸汽发生器可将蒸汽输出压力提高3巴，相比传统设计，且不影响对管束的检修和维护。管束出口处极高的饱和蒸汽压力（78巴）有助于提高EPR的效率（约37%）。蒸汽体积的增加和二级安全阀压力的提高，可防止管道破裂时液体泄漏到环境中。

反应堆冷却泵 (RCP) 是N4反应堆所用型号的改进版，确保反应堆冷却系统中冷却剂的强制循环。该循环过程将反应堆堆芯的热能传递至蒸汽发生器，在那里热能被转移至二次系统。

泵位于蒸汽发生器出口与四个一次回路反应堆储罐入口之间。由于在转子末端安装了静压轴承，这些泵具有极低的轴线振动水平。循环装置的性能得到提升，以确保符合EPR的工作点要求。反应堆冷却剂泵由三个主要部件组成：循环装置本身、用于确保紧急情况下密封性的轴封，以及防滴漏的笼型感应电机。泵的所有部件均可更换，并能轻松从外壳中取出，从而在发生受控泄漏时能够现场快速维护。

图29 RCP泵剖面图

大容量减压器（PZR）可确保设备60年的设计寿命，并在出现异常或紧急情况时更有效地运行。此外，减压器上还安装了专用阀门组，以防止高压熔毁事故的风险。



5.8. 核反应堆系统

用于EPR的系统是一套先进技术和解决方案的集合，可确保基于该反应堆的核电站具有高安全水平、高效能和经济性。

其中最重要的包括：

化学和体积控制系统（CHEMICAL AND VOLUME CONTROL - CVCS）可对反应堆冷却系统（RCS）中的水储备进行持续监控，并对注入RCS的所有液体的硼浓度进行持续监测。

安全注入系统/余热清除系统（SAFETY INJECTION SYSTEM/RESIDUAL HEAT REMOVAL SYSTEM- SIS/RHRS）可在蒸汽发生器传热效率不足时，将热量从反应堆冷却剂系统（RCS）转移至冷却水系统。此外，在发生紧急情况时，该系统可在反应堆停堆后将RCS核心出口温度维持在180°C以下。

应急供水系统（EMERGENCY FEEDWATER SYSTEM - EFWS）旨在确保当所有其他供水系统失效时，仍能向蒸汽发生器输送水。

应急给水系统（EMERGENCY FEEDWATER SYSTEM - EFWS）旨在确保当所有其他正常供水系统均无法使用时，仍能向蒸汽发生器供水。

附加硼化系统（THE EXTRA BORATING SYSTEM - EBS）确保反应堆冷却系统（RCS）获得足够的硼化，使其能够进入安全停堆状态，达到冷停堆所需的硼浓度。

组件冷却水系统（CCWS）在所有运行条件下，将安全相关系统、辅助运行系统和反应堆其余设备的热量传递至散热器。

核采样系统用于从反应堆壳体内的系统和设备中采集气体和液体样本。

排气和排空系统收集来自系统和设备的废气和液体，以便进行再处理。

蒸汽发生器吹扫系统可防止固体物质在二次侧水中积聚。

废物处理系统负责处理固体、气体和液体废物。

核反应堆的安全性是核能领域中的关键要素。实施严格的安全标准旨在保护人类和环境免受辐射的潜在影响。根据法国和德国安全机构的建议，首要的重要选择是采用基于进化方法的EPR设计，该方法借鉴了法马通或西门子此前建造的96座反应堆的经验。该选择使我们能够提供基于最新设计的进化型反应堆（法国N4反应堆和德国KONVOI反应堆），同时避免采用未经验证的技术所带来的风险。

为进一步降低堆芯熔毁的可能性，EPR的措施集中在三个领域：

在设计阶段就扩大考虑的运行条件范围，包括：

- 采用概率安全评估
- 加强防范内部和外部风险

明智选择设备和系统，以降低异常情况演变为事故的风险：

- 简化安全系统，优化其冗余性和多样性
- 优化因蒸汽发生器管道意外破裂而采取的修复措施

提高操作员在紧急情况下的可靠性；延长操作员可用的运行时间

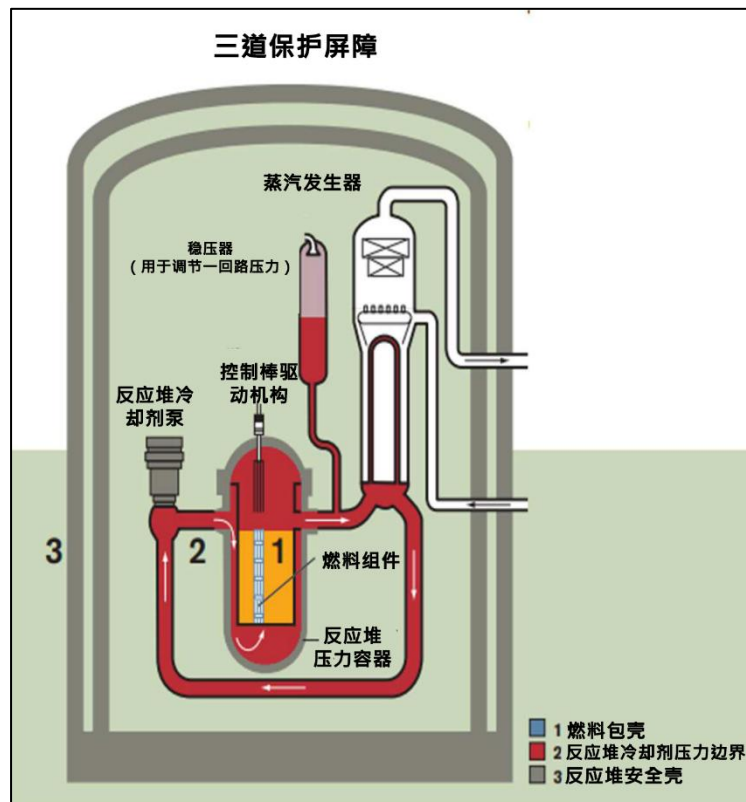


图30 EPR反应堆的三道防护屏障示意图

还重点关注了旨在最大限度减轻严重事故后果的具体设计决策：

使用特殊阀门，以防止高压力导致堆芯熔毁。

采用高机械强度的反应堆容器，以防止熔融堆芯与冷却剂之间发生高能反应。

设计反应堆内壳时考虑了以下功能：

- 壳体结构需承受氢气燃烧产生的压力。
- 密封式散热系统及长期残余热量清除装置
- 采用带热交换器和专用散热器的专用喷淋系统。
- 可将水直接输送到核心捕集器，而非喷淋系统。
- 6毫米厚的金属衬里覆盖着内部的压缩混凝土涂层
- 内部通道配备备用截止阀和泄漏回收装置
- 外围建筑结构及管道密封系统可有效防止涂层直接向环境泄漏。
- 内外涂层之间的空间被被动地保持在轻微负压状态，以便泄漏物在此处聚集。
- 烟囱前的特殊通风和过滤系统

5.9. 核电站功率调节系统

对于压水堆（PWR）类型的反应堆，功率变化主要通过改变调节棒的位置来实现，而通过改变一次回路中硼酸的浓度来精确调节反应堆堆芯的反应性。

在第三代核电站中，从100%满负荷到25%满负荷的功率变化在设计之初就已考虑在内。例如，EPR反应堆设计了两种负荷跟踪曲线：

- 在60%至100%最大负荷范围内以5%最大负荷/分钟的速度跟随负荷变化（燃料消耗至80%时），
- 以2.5%最大负荷/分钟的速度跟随25%至60%最大负荷的负荷变化。

在第三代核电站中，功率从100% MN到25% MN的变化从设计之初就被考虑在内。新型核电站的功率可在1260兆瓦至630兆瓦范围内调节，调节速度约为63兆瓦/分钟。如下图所示，其灵活性优于燃煤或燃气电站，但无法达到燃气机组等设备的最低功率水平。

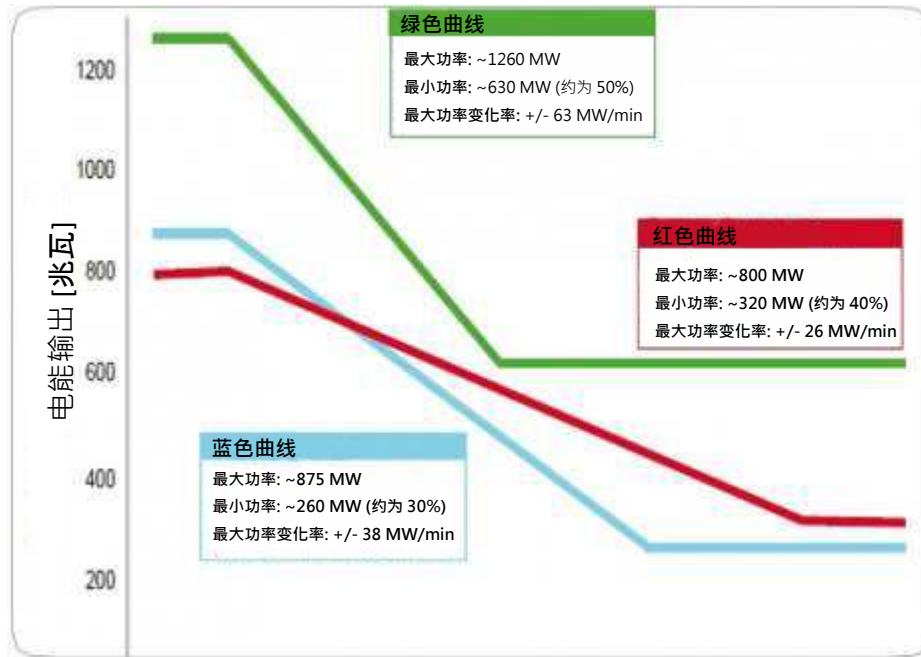


图31 不同类型系统电厂负荷（功率）变化速率比较

如图所示，系统发电厂的功率调整时间间隔大致相同。核电站可在10分钟内改变630兆瓦的功率，燃煤电厂可在12分钟内改变480兆瓦的功率，而燃气联合循环发电厂（CCGT）可在21分钟内改变500兆瓦的功率。这分别相当于63兆瓦/分钟、26兆瓦/分钟和38兆瓦/分钟的功率变化速率。

由此可见，核电站不仅能够负荷跟踪系统中运行，而且其运行效果优于燃煤和燃气电站。

5.10. 建设部分

- 地质工程条件描述

根据本研究第3.4.4条，基于公开资料描述了该地区的地质构造，但在公开资源中未找到有关地质工程条件的资料。

在实施前，需根据2012年4月25日交通、建设与海洋经济部长关于确定建筑物地基地质条件的条例以及2012年8月10日内阁部长关于实施建筑物地基地质条件详细范围的条例，对地基进行详细勘察。2012年4月25日关于确定建筑物地基地质条件的条例以及2012年8月10日部长理事会关于核设施选址用地评估范围的详细规定 排除该场地符合核设施选址要求的条件以及核设施选址报告要求的规定

- 施工后勤保障

施工后勤设施将由一系列用于发电厂建设的临时建筑组成。基本设施包括：

- 员工生活区及办公楼
 - 门卫室
 - 混凝土搅拌站
 - 仓库和堆放场
 - 预制件组装车间
 - 车间
 - 配电室
 - 废物处理设施
 - 临时道路
- 建筑物和构筑物的描述



图32 EPR核电站主要建筑

- 反应堆建筑（蒸汽供应系统和燃料补充水箱）(1)

反应堆建筑为双层安全壳结构的巨型钢筋混凝土建筑——由内部钢筋混凝土安全壳（一级安全壳）和外部钢筋混凝土屏蔽层（二级安全壳）组成。内部设有反应堆压力容器、蒸汽发生器及冷却系统。该设施还包含用于事故时补充水源的反应堆水箱以及燃料装卸操作系统。该建筑满足抗外部冲击（包括飞机撞击）、辐射和地震荷载的要求。建筑物通过桩基固定在坚固的底板上。

- 燃料库 (2)

这是一座钢筋混凝土结构的安全技术设施，用于储存新鲜和乏燃料。

内含带生物屏蔽的乏燃料池、燃料棒操作室、起重机及辐射监测系统。该建筑结构具备辐射防护、过滤通风及放射性物质泄漏防护功能。

- 安全系统建筑 (3)

这些建筑物对称地分布在反应堆建筑物的两侧，是高度加固的钢筋混凝土结构，内部设有堆芯应急冷却系统、安全注入系统、安全阀和安全泵。这些建筑彼此独立，确保了冗余性和物理分离性。这些结构能够抵抗地震、洪水和机械冲击。

- 柴油发电机房 (4)

每台柴油发电机都安置在独立的钢筋混凝土机房内，该机房具有增强的结构抗震能力。这些建筑内设有发电机组、燃料罐、启动和冷却系统以及独立的通风和过滤系统。其结构确保在完全失去外部电源（SBO）的情况下，安全系统仍能获得自主供电。

- 辅助建筑 (5)

这是一座多功能钢筋混凝土结构建筑，紧邻反应堆建筑。内部设有辅助设备，如通风系统、水处理系统、测量系统、电气系统和自动化系统。还包含控制室、技术室和通道室。该设施确保支持系统的持续运行，并与设施其他区域保持通信。

- 放射性废物处理厂房 (6)

该设施设计为带防护罩的钢筋混凝土大厅，设有独立的低中活度放射性废物分拣、处理、调理和临时储存区。配备辐射监测、通风及空气过滤系统。其结构确保与环境完全隔离，并能抵御外部因素影响。

- 涡轮机房 (7)

该建筑为钢筋混凝土框架结构，内置蒸汽涡轮机、发电机和冷凝器。建筑内配备用于设备安装和维护的桥式起重机。

5.11. 工艺平衡

针对选定的EPR-1600核反应堆，使用Thermoflow软件包中的STEAM PRO程序进行了热力学计算。该模型考虑了国际原子能机构（IAEA）提供的技术参数以及Desire项目先前任务报告的结果。

该模型考虑了核电机组的汽轮机部分，未对反应堆进行详细分析，将其视为黑匣子。仅考虑了反应堆传递给蒸汽发生器的功率水平，该功率随后将输送至汽轮机。机组以100%功率运行。

冷凝，冷却则采用冷却塔。此外，根据西里西亚理工大学的分析，冷却系统采用了冷凝器串联连接方案，因为这可减少机组运行所需冷却系统中的水量。关于冷凝器连接方式及其对冷却水量的影响的详细比较，详见任务3的报告。

下图展示了基于IMGW数据确定的下奥德河地区（格里芬诺市）年平均环境温度（9°C）下，EPR-1600机组蒸汽部分的模型计算结果。

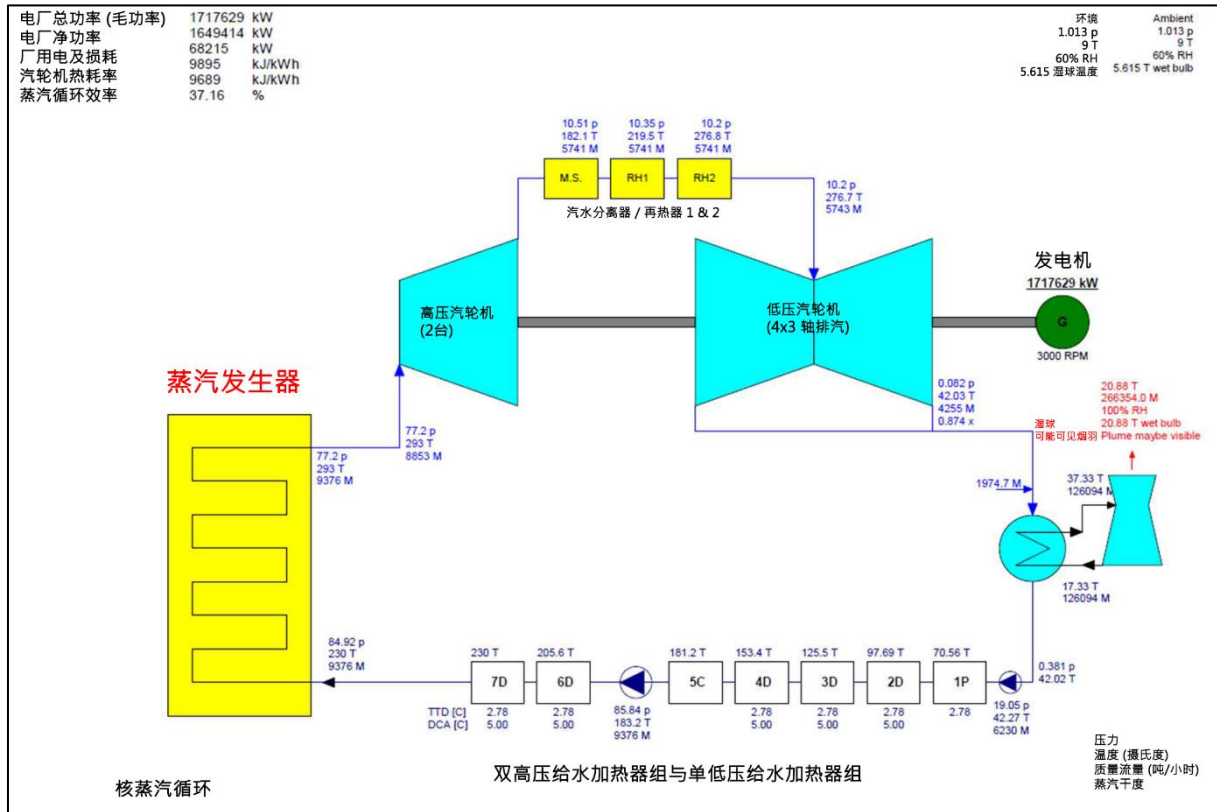


图33 EPR-1600 机组带冷却系统的蒸汽流程图

下表汇总了为下奥德河选址模拟的EPR-1600机组主要参数。相较于上述方案，自用电量水平有所提高，因为该方案未考虑电厂其他设备（蒸汽部分除外）。根据国际原子能机构数据，整个机组的自用电量水平设定为6.8%。

表11 下奥德河选址EPR-1600机组预测参数

参数	单位	EPR-1600
反应堆热功率	MWt	4 500
机组总装机容量	MWe	1 717
机组净发电量	MWe	1 600
机组总效率	%	38.1
冷却水流量	吨/小时	126 094
冷却系统补水量	吨/小时	3 693
补充去离子水	吨/小时	29.71
核燃料	千克	3.21

该机组的年度预测产量和消耗量是基于84.2%的可用率计算得出的。该可用率数据源自《波兰核能计划》。该水平接近欧洲平均值（82.5%），近年来捷克（83.9%）和瑞士（83.4%）等核反应堆数量相对较少的国家（分别为6座和4座）也报告了类似的可用率指标。

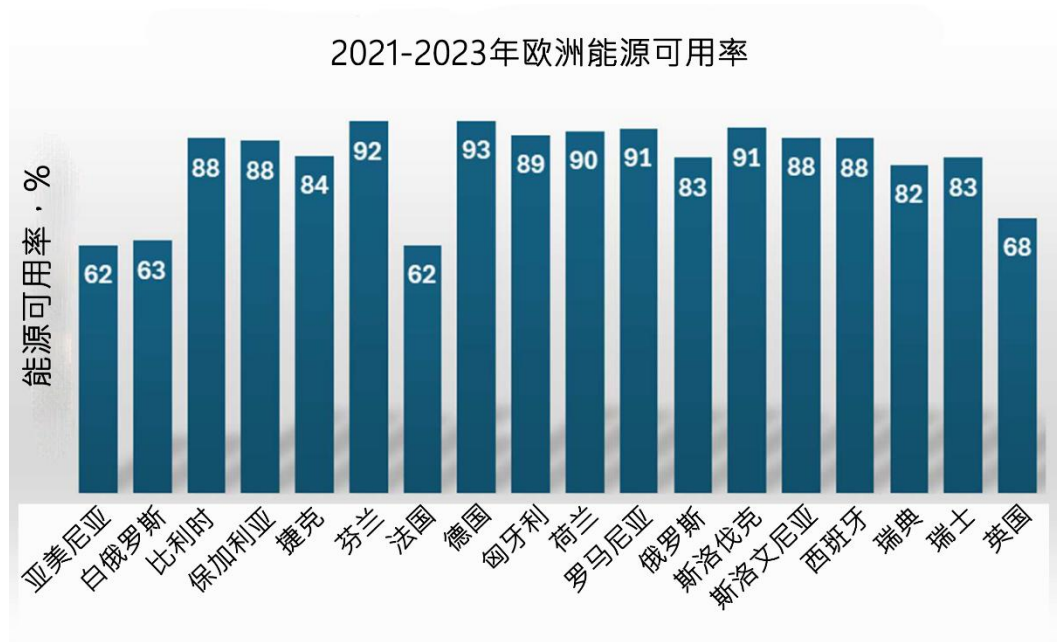

 图34 2021-2023年欧洲核电机组可用率指标（根据国际原子能机构数据）²⁴
²⁴ <https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/ThreeYrsEnergyAvailabilityFactor.aspx>

表12 下奥德河地区EPR-1600机组预测年产量数据

参数	单位	EPR-1600
可用性	%	84.2
发电量	千兆瓦时	12 664
电力销售	千兆瓦时	11 801
核燃料	吨/年	23.7
冷却系统补水	千吨/年	27 245
补充去离子水	千吨/年	219

上述数值将作为对所述项目经济效益分析的基础，该分析将在本报告的下一部分中呈现。

6. 投资支出估算

6.1. 资本支出结构

在国际术语中，资本支出（CAPEX）按复杂程度分为以下等级：

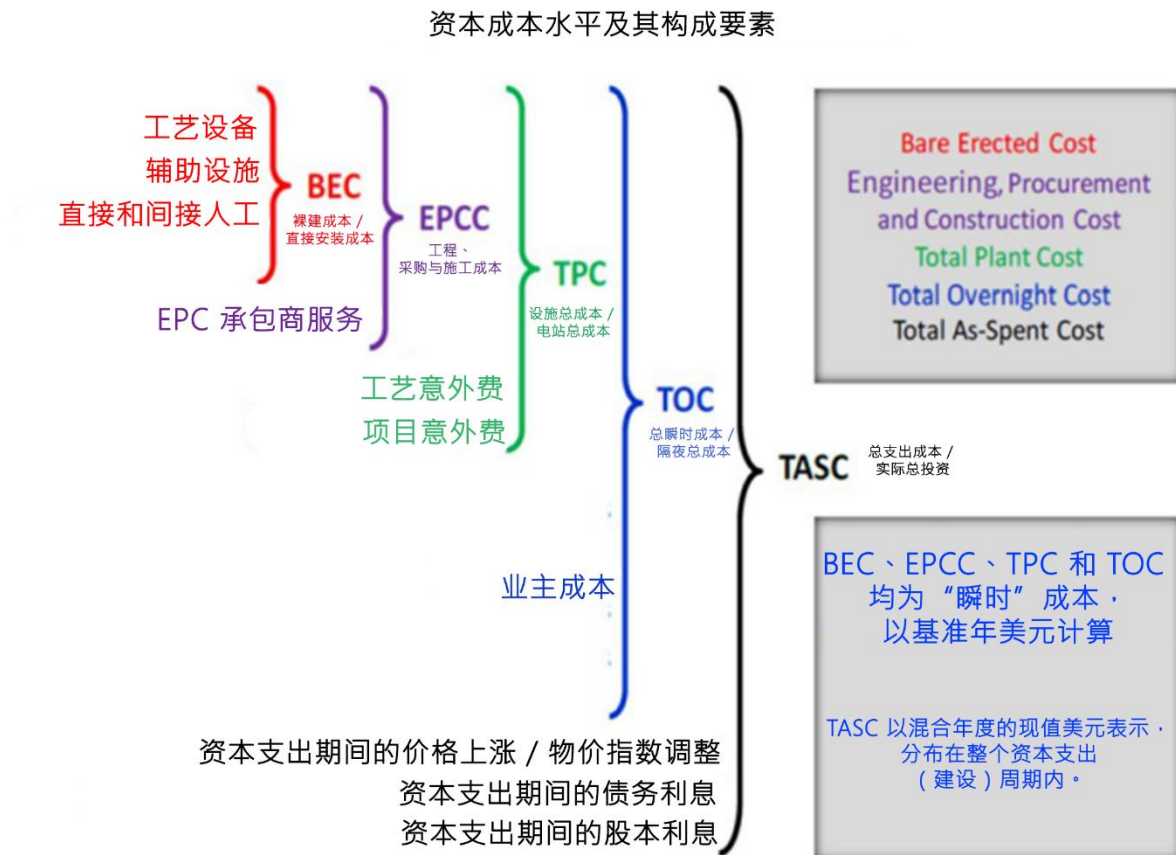


图35 CAPEX结构

数据来源：NETL，2011年4月。能源系统研究质量指南：NETL评估发电厂性能的成本估算方法。美国能源部，国家能源技术中心，宾夕法尼亚州匹兹堡（报告）。

NETL 发电厂性能评估方法论。美国能源部，国家能源技术中心，宾夕法尼亚州匹兹堡（报告 DOE/NETL-2011/1455）

- BEC——即所谓的“硬性直接成本”，涵盖材料和设备供应、人力成本以及设备成本。
- EPCC——这些费用包含BEC以及EPC总承包商的间接成本（例如项目协调与管理、认证机构和监理单位的认证与验收、施工后勤保障的准备与维护、安装期间的公用设施、培训、保险、调试等）。

- TPC——这些成本包括EPCC、承包商风险成本以及项目财务储备金。
- TOC——这些成本包括TPC和投资者的成本（例如：投资者的实施团队、合同工程师服务、保修测量、费用、专家评估、咨询、保险等）。

（上述所有资本支出成本均以固定价格表示。）

- TASC——这些成本包括TOC，并按投资期间（从设施建设到交付使用期间）的可变价格计算，包括资本成本、利息和合同指数化。

在本节中，我们估算了TOC成本组中的投资支出水平。可变成本已在本文后续部分的经济分析中予以考虑。

6.2. 方法论

为确定在Dolna Odra电厂新建一座EPR-1600机组的成本，采取了以下步骤：

- 根据行业研究报告，确定了各资本支出项目的成本百分比分配
- 根据新闻报道，采用绿地模式计算EPR-1600机组的单位建设成本
- 已估算在现有电厂内建造新的EPR-1600机组的其他相关成本，并考虑了由此产生的节省。
- 已制定在波兰奥德拉核电站内建造一座EPR-1600级机组的估计资本支出

6.3. 确定投资支出的百分比分布

下表基于美国能源部2022年发布的《调查将退役燃煤电厂改造成核电站的效益与挑战》文件，按绿地模式计算了EPR-1600机组各成本组别的可能成本分摊比例。

鉴于上述研究中直接成本占TOC成本的58%，而本文作者认为该数值偏高，故决定根据麻省理工学院核科学与工程系2022年发布的《先进核电站资本成本估算》报告，对投资支出的百分比分布进行修正。该研究于2022年发表。

上述研究报告主要涉及PWR12型机组（AP-1000机组的前代产品），其中直接成本占总运营成本（TOC）的48.91%。尽管技术存在差异，但该研究作者提出的直接成本与间接成本的划分方式。

本研究报告假设EPR-1600机组的成本百分比分布与AP-1000机组相同。

在麻省理工学院核科学与工程系的研究中，间接成本占比比在研究中高出9.09个百分点。

美国能源部。因此，间接成本提高了9.09个百分点，而美国能源部的直接成本则降低了9.09个百分点，以保持直接成本各组成部分在间接成本和直接成本组中的比例分配。结果如下表所示。

表13 EPR-1600机组投资成本估算百分比分布

序号	TOC成本明细 (1台EPR-1600机组) 绿地	占投资资本的百分比 占投资资本
1	燃料初步盘点	8.5%
2	业主成本	11.8%
3	土地及土地使用权	0.4%
4	辅助基础设施	12.6%
5	反应堆岛	15.2%
6	涡轮岛	12.6%
7	电力岛	4.2%
8	其他仪器和设备	1.7%
9	冷凝器和散热系统	2.5
10	间接成本总额	30.4%
11	投资资本总份额	100.0%
12	直接成本 (第4-9项) % TOC	48.9
13	间接成本 (第1-3项和第10项) % TOC	51.1

数据来源：基于《调查将退役燃煤电厂转换为核电站的效益与挑战》文件的自主计算；美国能源部；2022年；以及《先进核电站资本成本估算》；美国麻省理工学院核科学与工程系；2022年。

6.4. 根据新闻稿确定EPR-1600机组的单位建设成本指标

在上述题为《调查将退役燃煤电厂改建为核电站的效益与挑战》的研究报告中，PWR级机组在TOC成本组中的单位建设成本被列为**4572美元/千瓦**。本文作者认为，由于近年来受疫情和地缘政治局势影响，服务和材料价格上涨，该指标可能被低估。因此，决定基于新闻报道进行估值。

2022年12月，媒体报道 (<https://energetyka24.com/atom/analizy-i-komentarze/ile-zaplaci-polska-za-elektrownie-jadrowa-komentarz>) 显示，AP-1000机组的单位建设成本可能达到约**5267美元/千瓦**（按2022年10月28日汇率4.7477计算，1台AP1000机组成本为312.6亿波兰兹罗提）。

然而，欧洲核能协会（PEJ）2024年4月发布的最新新闻稿 (<https://www.money.pl/gospodarka/polski-atom-za-150-mln-dz-sa-tez-prognozy-ws-terminu-7018323225906112a.html>) 显示，三台AP-1000机组的总成本约为1500亿波兰兹罗提，这意味着每台AP-1000机组的单位建设成本为**10,000美元/千瓦**。该文章未说明该指标的具体内容——是净额还是总额，是固定价格还是浮动价格，是否包含维护服务等。根据不同的解释，本文作者认为该指标可能在**6500至10000美元/千瓦**之间。

根据麻省理工学院最新研究报告《2024年下一代AP1000总成本预测》，目前后续AP1000机组的总拥有成本（TOC）在**9300至11625美元/千瓦**之间。

基于上述信息，本研究**决定将单位指标设定为10,000美元/千瓦**。该指标既符合PEJ发布的新闻稿信息，也处于麻省理工学院最新研究报告《2024年下一代AP1000总成本预测》所确定的区间范围内。

新闻稿显示，EPR-1600机组的单价可能更低，但鉴于信息的不确定性和成本估算处于早期阶段，最终决定将两项指标统一。因此，决定将AP-1000机组**10,000美元/kWe**的单位指标采用于EPR-1600机组。最终单价水平将通过招标确定，不排除最终证实媒体报道所称EPR-1600单价低于AP1000的可能性。

本报告后续部分的经济部分包含对资本支出水平对结果敏感性的分析，其范围涵盖在既定资本支出水平上下可能出现的偏差。

6.5. 确定与计划投资地点相关的额外成本和节省

下文列出了因投资选址于多尔纳奥德拉发电厂而产生的额外成本（增加资本支出）、节省（降低资本支出）和潜在避免成本。

➤ 额外成本

在多尔纳奥德拉发电厂实施投资项目需承担以下额外及非机组相关费用

- 场地清理费用——拆除、拆卸和整平（8台200MW机组，包括排气系统、煤场和变压器站）。这些成本未计入资本支出（Capex）的计算中，因为无论现有电厂所在区域是否将新建发电机组，这些成本投资者都必须承担。

即使不进行新投资，随着旧燃煤机组生命周期的结束，该区域仍需进行清理，拆除现有设施。

这些成本估计为3.5亿波兰兹罗提净额。

- 冷却水取水口、排放口及泵房的翻新费用。该费用估计为净额200万波兰兹罗提。
- 将电力输送至SE Krajinik的成本——400千伏线路。该成本估计为
净额1000万波兰兹罗提。

➤ 节约

- 利用取水口、泄洪道和冷却水泵房建筑产生的节约——无需建造这些设施。
这些节省估计为净额2700万波兰兹罗提。
- 无需购置土地产生的节省费用该节省费用估计为净值2.273亿波兰兹罗提。

➤ 潜在**避免成本**（不属于核电机组建设指标范围的群体）

下表列出了与未利用现有能源和物流基础设施的地点相比，利用下奥德河核电站地点所避免的成本。潜在避免成本基于研究作者根据其他具有不同选址条件的核电机组选址情况所作的假设。因此，采用了平均假设估算值。

- 建设取水渠和向河流排水渠的成本——计划建设1公里取水渠和1公里排水渠
节省金额估计为净额2.2亿波兰兹罗提。
- 通道建设成本——假设为25公里。这些节省估计为1.25亿波兰兹罗提净值。
- 单轨铁路线成本——假设为25公里。这些节省估计为6.25亿波兰兹罗提净值。
- 当投资地点远离现有变电站时，由电网运营商估算的运营商变电站建设成本，根据双边协议，投资者可分担部分成本。此类变电站的净成本约为8000万波兰兹罗提。

6.6. 资本支出 (CAPEX) 的确定

➤ 假设

- 以下所有金额均不含增值税，并按2024年固定价格列示。
- APR-1600机组的单位投资成本依据第6.4节所述的新闻报道及行业出版物估算得出，净值为10,000美元/千瓦。而各项成本的百分比分配则基于行业出版物中的信息确定。
- PWR级机组建设单位指标范围外的要素以及附加成本和节约额，是基于公开的市场工程和投资项目价格公告（如Bistyp或Sekocenbud等出版物）以及B.S.P.i R价格指数进行估算的。“Energoprojekt - Katowice” S.A.的价格指数，该指数基于多年设计和估算规模及技术参数相似的设备成本的经验。
- 货币换算采用以下汇率：1美元=4波兰兹罗提。
- 用于计算的EPR-1600机组功率：1770 MWe（总功率）
- 本研究处于初步可行性研究阶段。根据 AACE 国际推荐实践分类系统，预计评估范围的准确性如下表所示：

表 14 根据 AACE 国际推荐实践对 CAPEX 估算精度的分类

估算级别	主要特征		次要特征	
	主要特征：项目定义交付物的成熟度 (以完成定义的 % 表示)	次要特征：最终用途 (典型的估算目的)	次要特征：方法论 (典型的估算方法)	次要特征：预期准确度范围 (低值与高值的典型波动范围)
5 级	0% 至 2%	概念筛选	产能系数法、参数模型、判断或类比法	L: -20% 至 -50% H: +30% 至 +100%
4 级	1% 至 15%	方案研究或可行性研究	设备系数法或参数模型	L: -15% 至 -30% H: +20% 至 +50%
3 级	10% 至 40%	预算授权或控制	带有组件级清单的半详细单价法	L: -10% 至 -20% H: +10% 至 +30%
2 级	30% 至 75%	控制或投标/标书	带有强制详细工程量清单的详细单价法	L: -5% 至 -15% H: +5% 至 +20%
1 级	65% 至 100%	校验估算或投标/标书	带有详细工程量清单的详细单价法	L: -3% 至 -10% H: +3% 至 +15%

流程工业成本估算分类矩阵

由此可得出概念阶段与正式可行性研究阶段之间的估值范围精度。

➤ 计算

单台EPR-1600机组的总成本按以下方式计算：100亿美元/兆瓦×1770兆瓦=10×1770=177.7亿美元净值

根据波兰国家银行的数据，2024年美元汇率在4.0波兰兹罗提左右波动。为便于本报告分析，我们采用了该统一汇率

按1美元=4波兰兹罗提的汇率换算后，得出净值为：17700×4=70800百万波兰兹罗提

随后，上述成本根据行业信息得出的上述假设，被分解为各个组成部分。

下一步，增加了额外成本，并扣除因设施位于下奥德河发电厂而产生的节省。结果见下表。

表15 在下奥德河发电厂区域建造一座EPR-1600级反应堆的估计成本

序号	工程明细 (1台EPR-1600机组)	占指标的百分比	价值 (百万波兰兹罗提) 净值
1	燃料初步盘点	8.5	6 028,6
2	其他费用 (业主费、传输费)	11.8%	8 353,9
3	土地及土地使用权	0.4%	258,4
4	辅助基础设施	12.6%	8 955,6
5	反应堆岛	15.2%	10 746,7
6	涡轮岛	12.6%	8 955,6
7	电力岛	4.2	2 985,2
8	其他仪器和设备	1.7%	1 194,1
9	冷凝器和散热系统	2.5	1 791,1
10	间接成本总额	30.4%	21 530,8
11	总块成本指标	100.0%	70 800.0
12	向SE Krajnik输送电力的成本 - 400千伏线路		10,0
13	利用冷却水取水口、排放口和泵房建筑所节省的成本		-25,0
14	因无需购置土地而节省的费用		-258,4
15	总投资额		70 526,6

数据来源：自主计算

上述计算未包含避免成本，因为这些成本不会影响资本支出，无需承担，且不属于核电机组建设指标范围，因此不会降低上述成本。

然而，在多尔纳奥德拉发电厂区域内，避免成本构成了附加价值。其水平因核电站潜在选址的不同而存在显著差异。因此，无法精确计算由此产生的节省金额，因为此类计算只能针对其他具体选址进行。

下表列出了基于平均假设估算值的避免成本：

表16 基于假设的工程量清单数据计算的潜在避免成本

序号	在El. Dolna Odra地区投资选址可能避免的额外成本	价值（百万波兰兹罗提）净值
1.	建设取水渠和向河流排放水渠的成本 - 假设取水渠长度为1公里，排水渠长度为1公里	220
2.	通道道路建设成本 - 规划25公里	125
3.	单线铁路成本 - 假设25公里	625
4.	潜在避免成本总计	970

数据来源：自主计算

6.7. 绿地项目与棕地项目对比

对位于下奥德河地区与绿地地区的一台EPR-1600机组成本进行了比较。结果如下表所示：

表17 成本比较

序号	工程明细（1台EPR-1600机组）	Brownfield 净值 净值（百万波兰兹罗提）	绿地项目净值 净值（百万波兰兹罗提）
1	燃料初步盘点	6 028,6	6 028,6
2	其他费用（所有权、运输）	8 353,9	8 353,9
3	土地及土地使用权	0.0	258.4
4	辅助基础设施	8 955,6	8 955,6
5	反应堆岛	10 746,7	10 746,7
6	涡轮岛	8 955,6	8 955,6
7	电力岛	2 985,2	2 985,2
8	其他仪器和设备	1 194,1	1 194,1
9	冷凝器和散热系统	1 791,1	1 791,1
10	间接成本总额	21 530,8	21 530,8
11	利用取水口、排放口和冷却水泵房建筑产生的节约，包括必要的翻新成本	-25.0	0
12	电力输出成本，对于绿地项目，假设为2 x 1公里	10.0	20.0
13	建设取水渠和向河流排放水渠的成本 - 假设取水渠长度为1公里，排水渠长度为1公里	0	220.0
14	通道道路建设成本 - 规划25公里	0	125.0
15	单线铁路成本 - 规划长度25公里	0	625.0
16	总投资额	70 526,6	71 790,0

数据来源：自主计算

从上表可见，Brownfield方案的成本比Greenfield方案低约1.8%。但需指出的是，Brownfield方案在Dolna Odra选址还具有

两个重要因素：

- 社会因素，即维持当地就业岗位、保留现有电厂的能源领域经验人才，以及延续能源公司的组织文化。
- 基础设施方面，即利用现有能源基础设施（输电线路和变电站）及交通基础设施（公路、铁路），这些设施在电厂关闭后将变得多余。

7. 针对既定目标的经济效益分析，并扩展至投资风险分析（对法律经济环境变化的敏感性分析），

7.1. 研究对象与研究目标

针对该项目，采用FCFF（企业自由现金流）公式构建了DCF经济模型。分析中计算了LCOE指标，该指标确定了平衡特定类型发电装置生产成本的最低电价。这也是使电力销售能够突破投资盈亏平衡点的最低价格。

未计算净现值（NPV）或内部收益率（IRR）等标准盈利指标，因为平准化度电成本（LCoE）指标能更便捷地比较不同技术，且无需对未来电价进行预测。在当前形势和市场变化下，对未来70-80年的能源价格进行预测存在较大的误差范围。

LCOE指标[PLN/MWh] 平准化能源成本——指生产1 MWh电能的平均成本，计算公式如下：

$$LCoE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{(I_t + M_t)}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}}$$

图36 LCoE的计算公式

其中：

I_t - t 年的资本支出（CAPEX）

M_t - t 年的运营支出（OPEX）

r - 税前贴现率

E_t - t 年的热量产量

经济分析还包括对 LCoE 对经济核算关键变量的敏感性分析。

7.2. 假设

- 分析期为70年，包括：
 - 投资（建设）周期：10年
 - 运营期：60年
 - 预计该机组将于2040年后投入运行。
- 计算以年度为单位，采用净价（不含增值税）和实际价格（不考虑通货膨胀）进行。
- 企业所得税税率——19%
- 残值（RV）按固定资产净值计算

7.2.1. 投资支出

投资支出在第6章中有详细说明。下表按绿地项目和棕地项目分类列出了投资支出计划。

表18 投资支出时间表，净值（百万波兰兹罗提）

资本支出	总计	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Greenfield, 百万波兰兹罗提净值	70 527	1 411	3 879	8 463	13 929	11 461	7 758	8 463	7 405	4 761	2 997
棕地, 百万波兰兹罗提净值	71 790	1 436	3 948	8 615	14 179	11 666	7 897	8 615	7 538	4 846	3 051

7.2.2. 贴现率

税前实际WACC贴现率为**6.98%**

$$WACC_{nom} = K_w * k_w * + K_o * k_o * (1 - T_c)$$

K_w – 股权资本成本（15.3%）

K_w = 无风险利率（5.24%²⁵） + 市场风险溢价（5.15%²⁶） + 项目风险溢价（2%）

k_w – 权益资本比例（30%）

K_o – 债务成本（7.24%）

K_o = 无风险利率（5.24%） + 债务溢价（2%）

k_o – 债务资本比例（70%）

T_c – 企业所得税率（19%）

$$WACC_{realny} = \frac{WACC_{nom} + 1}{CPI + 1} - 1$$

²⁵ 能源监管局主席公告；2024年第三季度

²⁶ Damodaran - 波兰股权风险溢价2024年7月1日

CPI——五年期通胀率（假设为2.5%²⁷）WACC计算的详细信息见.xlsx

模型

7.2.3. 汇率

欧元兑波兰兹罗提汇率基于nbp.pl网站发布的数据确定，该数据源自"专业预测者宏观经济预测——波兰国家银行宏观经济调查结果（2024年3月轮次）"，预测中位数为4.3，涵盖2024-2026年，并维持至计算期结束。

波兰国家银行（NBP）于2024年3月22日（星期五）将美元（USD）兑波兰兹罗提（PLN）汇率定为3.9928兹罗提，四舍五入至小数点后两位后为4.00 PLN/USD。根据彭博社等机构对未来几个季度的预测，欧元兑美元汇率将保持类似水平，因此分析中假设该趋势将持续。

表19 预期汇率

货币	单位	数值
美元	[PLN//USD]	4.0
欧元	[PLN/EUR]	4.3

7.3. 运营成本

$$OPEX = \text{variable OM cost} + \text{fixed OM cost per year}$$

经济分析涵盖以下运营成本：

- 燃料成本
- 废物处理成本
- 补水成本（用于循环系统和DEMI）
- 维修和升级
- 财产保险
- 核损害民事责任保险
- 房产税
- 员工薪酬和福利费用
- 未来机组拆除费用（拆除基金）

7.3.1. 燃料成本

燃料成本根据以兆瓦时（MWh）为单位的发电量计算。机组年发电量依据技术平衡表确定。在假设的基础可用率下，新机组年发电量为12,664,455兆瓦时。

根据不同来源的数据，多年来核燃料的单价变化如下图和下表所示。

²⁷ 波兰国家银行和货币政策委员会的通胀目标

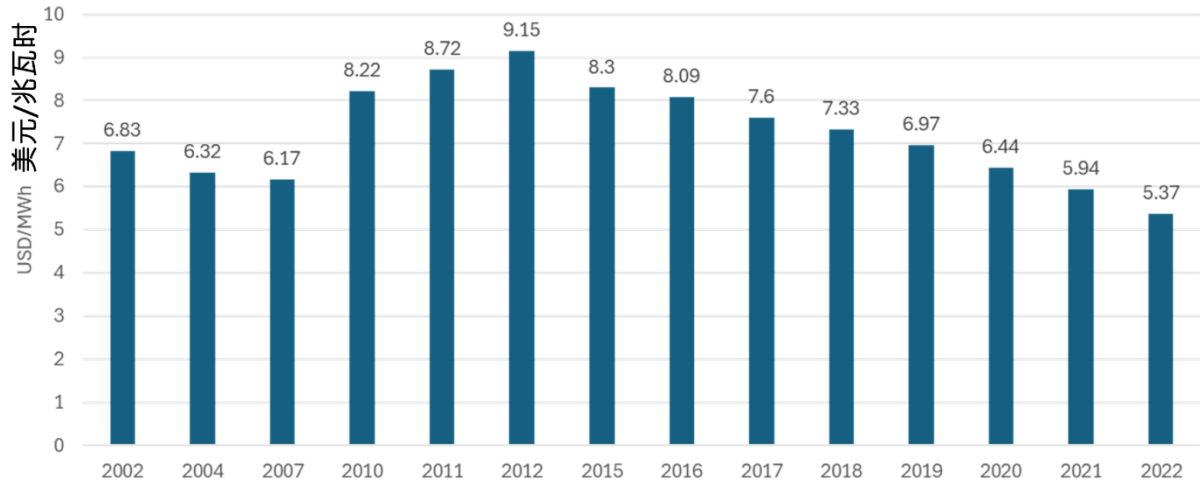


图37 历年核燃料成本

来源：NEI, 《核成本背景》，2023年

表20 核燃料价格来源

其他来源	价值	单位/年
国际原子能机构；《核电站长期运营的经济评估》 核电站的长期运行	7.00	美元 ₂₀₁₈ /兆瓦时
麻省理工学院；下一代AP1000机组隔夜资本成本	6.15	美元 ₂₀₂₂ /兆瓦时
麻省理工学院；下一代AP1000反应堆2024年总成本预测	6.25	美元 ₂₀₂₃ /兆瓦时

根据核能研究所²⁸的研究，单位燃料成本以美元/兆瓦时为单位计算，定为**5.37美元₂₀₂₂/兆瓦时**（考虑到美国通货膨胀率，燃料成本将达到5.73美元/兆瓦时）。最终，年度燃料成本约为**2.9亿波兰兹罗提**。

7.3.2. 核燃料的废燃料处理成本

燃料处理成本也根据发电量计算得出。单位指标根据以下研究报告确定：

- A.Strupczewski, 《波兰不同能源来源的电力成本分析与评估》，NCBJ, 2015年。
- K.Kołacińska、R.Sasin, 《波兰实施核能的成本效益分析》，能源市场, 2016年。

其中费率分别为2.33美元₂₀₁₅/MWh和2.17欧元₂₀₁₆/MWh。没有关于该成本的其他波兰来源的信息。

分析采用**3.53美元/兆瓦时**的费率（经调整后的平均值）。该数值包含乏燃料的清除、储存和处置费用。按年值计算，燃料处置成本约为**1.79亿波兰兹罗提**。

²⁸ 下一代AP1000反应堆的隔夜资本成本；科鲁什·希尔万；2022年3月

7.3.3. 水补充成本

原水和去离子水消耗量在第5.11点中确定。去离子水成本计算采用**10.35波兰兹罗提/吨**的电厂典型费率，该费率基于其他核电机组运行情况获得。

对于原水，假设用于补充冷却系统的原水将从河流中取用。根据《关于取水费率的市政条例》²⁹，原水的单位费率定为**1.5波兰兹罗提/吨**，该数值还包含了从河流中实际取水的成本。每年费用如下：约**230万波兰兹罗提**用于去离子水，约**4100万波兰兹罗提**用于原水。

7.3.4. 薪酬和员工福利成本

核能创造的工作岗位比任何其他能源都多。核电站（1 GWe反应堆）的标准雇员人数为500至800名固定员工，负责日常运营和维护。³⁰而其他来源³¹给出的EPR-1600机组雇员人数更高——600名雇员，最终分析中采用了该数值。

1名员工的毛薪与第二地点相同，为**14,700波兰兹罗提/月**，该数据来源于科济涅茨电厂ENEA SA集团的雇佣数据。而对于下奥德河地区，则未获得相关数据。社会保险及其他雇主负担福利水平设定为21%。

员工薪酬及福利的年度成本约为**1.28亿波兰兹罗提**。

7.3.5. 财产保险费用

财产保险费用按总投资额的0.323%/年计算，约合**2.28亿波兰兹罗提**。保险费率参照第二地点（科济涅茨）的标准制定，该地点提供了同等规模燃煤机组的详细信息。

7.3.6. 核损害民事责任保险

民事责任保险费用是根据设定的核损害最高保险金额及该金额的固定百分比计算得出，该费用在运营期间按年支付。最高保险金额为**13.5亿波兰兹罗提**（即根据原子能法规定的3亿特别提款权），年度保险费率（作为最高保险金额的百分比）为0.25%。最终保险金额按SDR=5.28波兰兹罗提的汇率计算约为**400万波兰兹罗提**。

7.3.7. 房地产税

房地产税按建筑物价值的百分比计算，建筑物在总投资支出结构中约占13%。根据现行法规，建筑物税率为建筑物价值的2%/年。最终，**年度税费约为1.83亿波兰兹罗提**。

²⁹ 部长理事会2023年10月26日关于水务服务单项收费标准的条例

³⁰ <https://info.westinghousenuclear.com/poland/news-and-insights/kariera-w-przemysle-jadrowym>。

³¹ 下一代AP1000反应堆的隔夜资本成本；科鲁什·希尔万；2022年3月

7.3.8. 维修成本（机组维护）

维修成本是根据核能研究所³²报告中提出的总发电成本指标³²确定的，该指标分为三个组成部分：

- 燃料成本
- 资本——资本支出，包括备件成本、改进支出和机组外基础设施支出。监管、信息通信技术和维护成本。
- 运营成本——包括材料和服务成本、燃料管理、外部服务、培训及薪酬等。

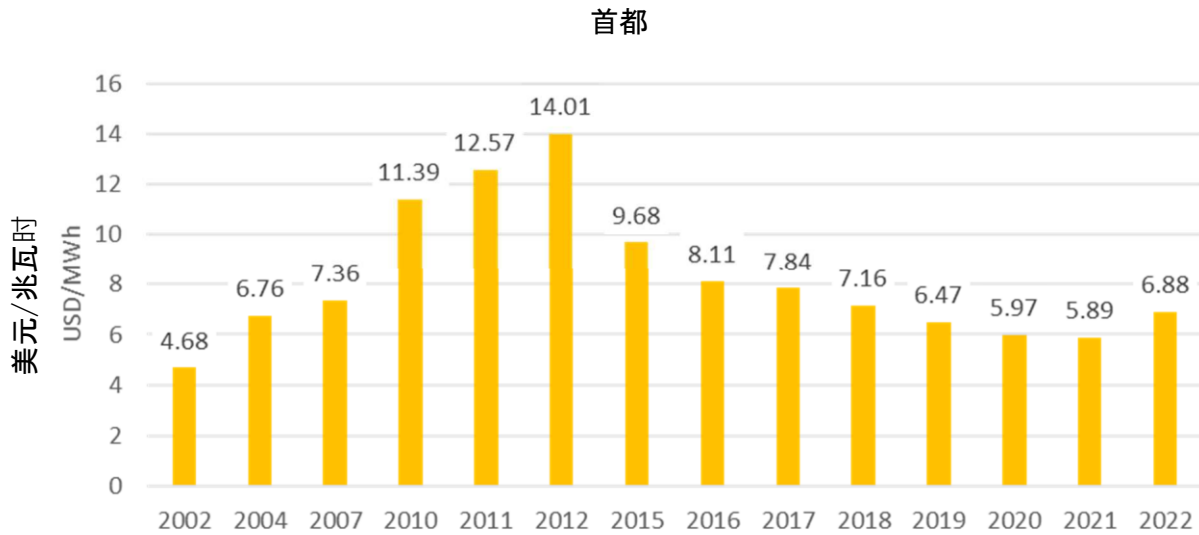


图38 单位资本成本 (Capital)

来源：NEI, 《核能成本背景分析》，2023年

³² 下一代AP1000反应堆的隔夜资本成本；科鲁什·希尔万；2022年3月

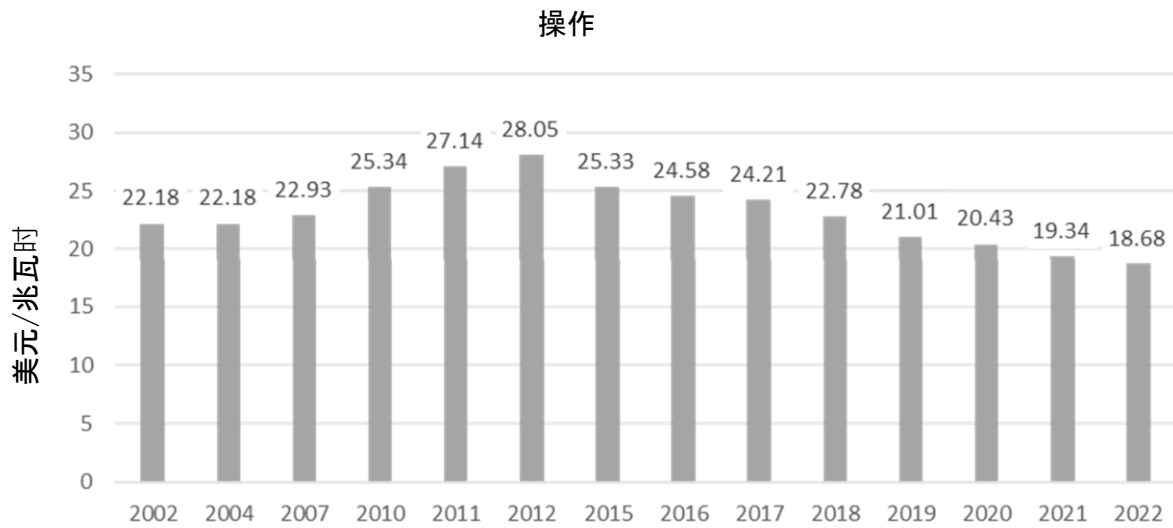


图39 单元运营成本 (Operating)

来源：NEI, 《核能成本背景分析》，2023年

维修成本包括全部资本支出和部分运营成本（即外部服务成本）。总成本为12.75美元/MWh，考虑到美国通货膨胀率后，实际成本为13.62美元/MWh。维修和现代化改造的总年成本约为6.9亿波兰兹罗提。

7.3.9. 设施未来拆除成本

根据国际原子能机构³³的研究报告，核设施未来拆除成本已获批准，拆除工作将在机组运行结束后启动，预计持续六年。为此，计划在每个运行年度按等额分期方式预留资金，该金额将用于覆盖核设施未来拆除成本。总成本可能达到总投资额的15%左右。每年维修基金的拨款额约为1.79亿兹罗提。

³³ 《核电站长期运行的经济评估：方法与经验》；国际原子能机构核能系列

的EPR-1600机组年度运营成本总计为
19.25亿波兰兹罗提。下图显示了各项成本在运营成本中的占比。

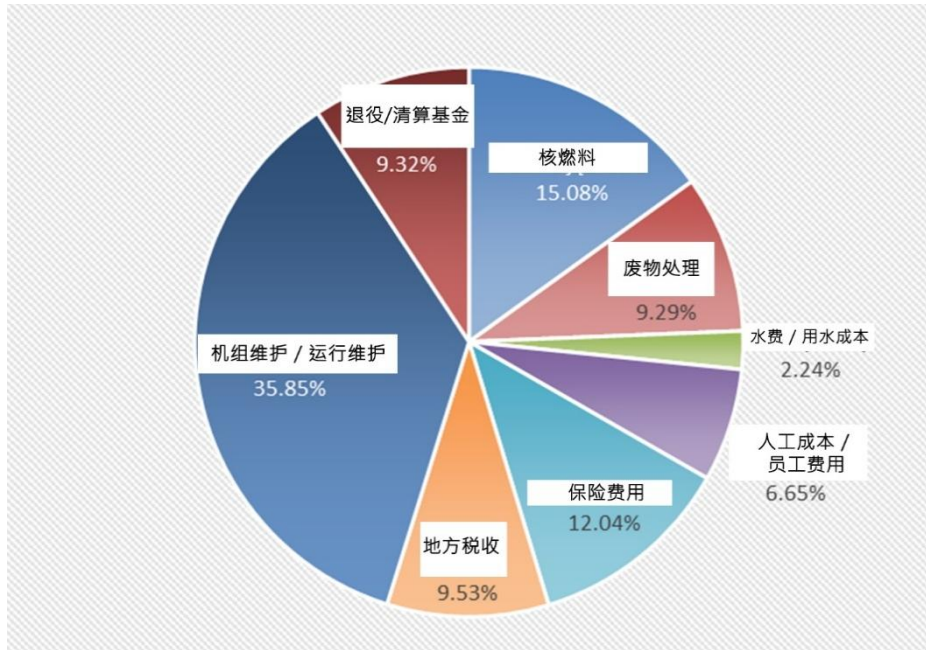


图40 EPR-1600 机组年度运营成本

7.4. 的平均度电成本 (LCoE) 结果

针对前述投资支出及机组运营成本，在假设发电量前提下，分别对Brownfield方案和Greenfield方案的度电成本 (LCoE) 进行了测算。

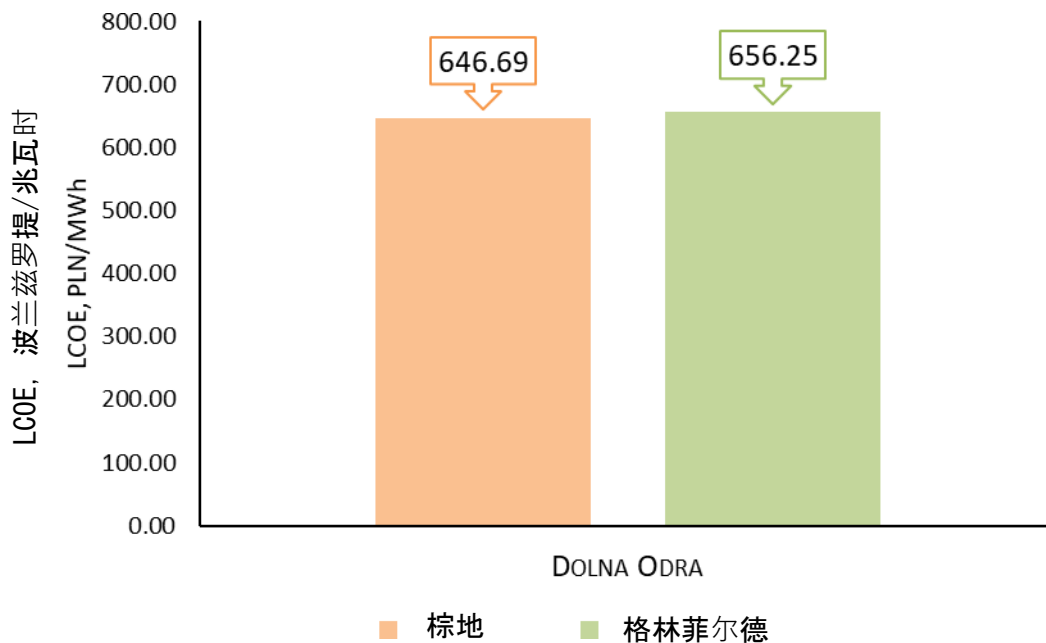


图41 棕地与绿地LCOE对比

下图显示了Brownfield方案的LCOE结构。

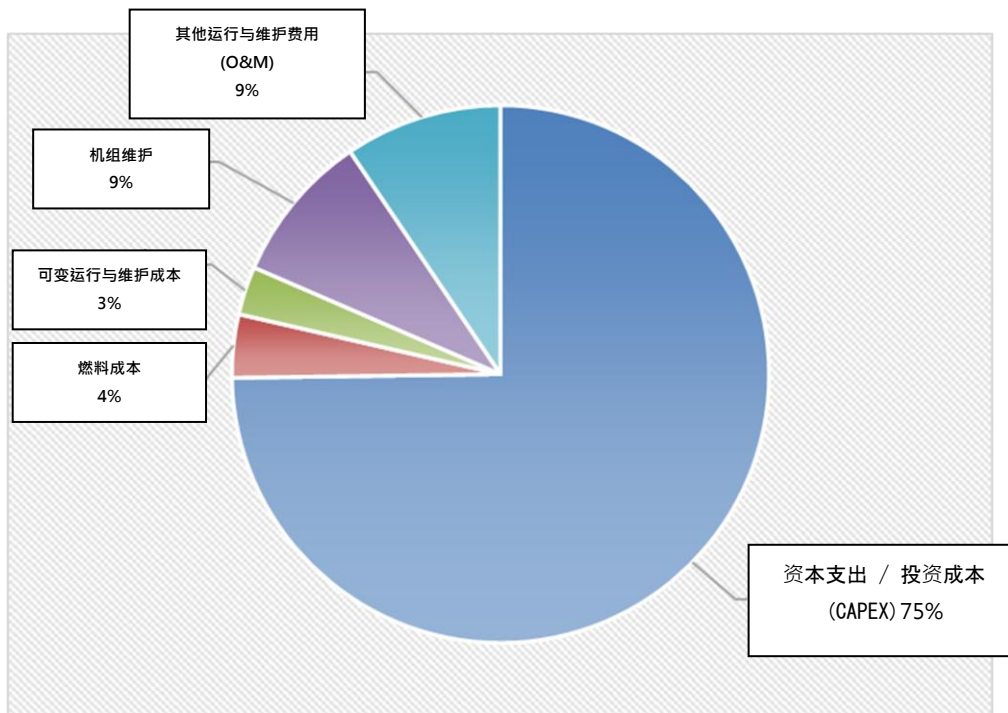


图42 确定的 (Brownfield) LCOE 结构

7.5. 敏感性分析

针对Brownfield方案进行了敏感性分析，分析涵盖以下关键变量，其强度范围为±50%（前两项）或可能值区间（后两项）：

- 投资支出、
- 核燃料价格、
- 机组运行/可用率指标（GCF）。
- 加权平均资本成本（WACC）

假设在特定时刻只有一个变量发生变化。其余变量保持在相同基准水平。

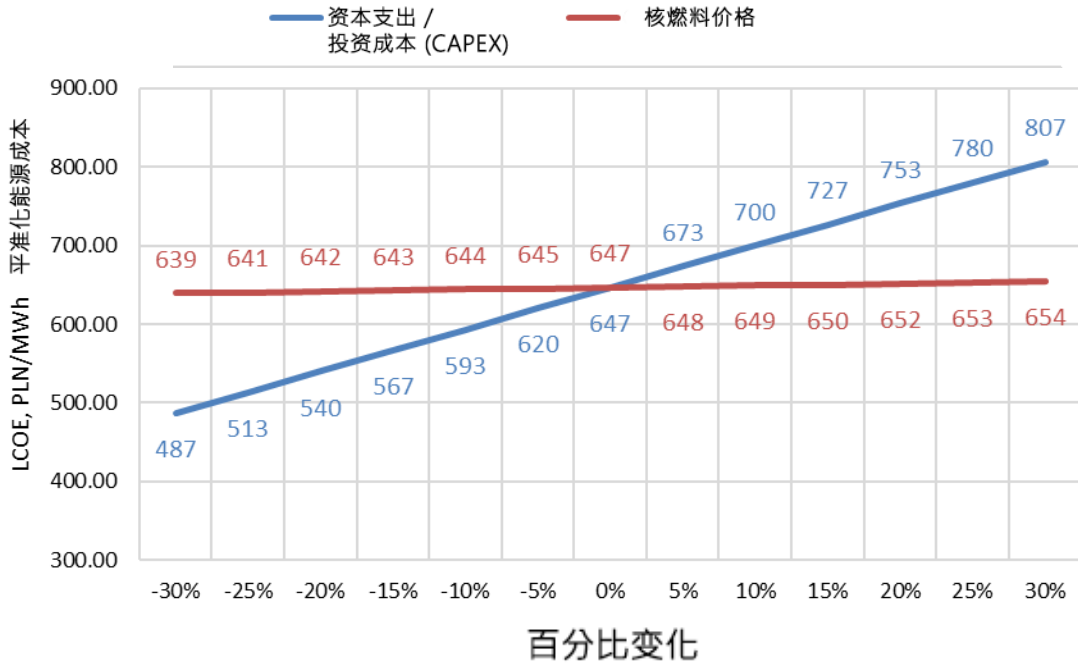


图43 敏感性分析结果——投资支出与核燃料价格

投资支出对LCOE的影响更大，而燃料成本的变化对电力生产成本的影响微乎其微。

基于额定容量利用率（GCF）在20%至92%之间的变化，进行了生产变化敏感性分析。GCF=100%的机组很可能无法达到，因此工作率的最大值为92%——这是国际原子能机构³⁴ 作为EPR-1600机组的典型可用性值。

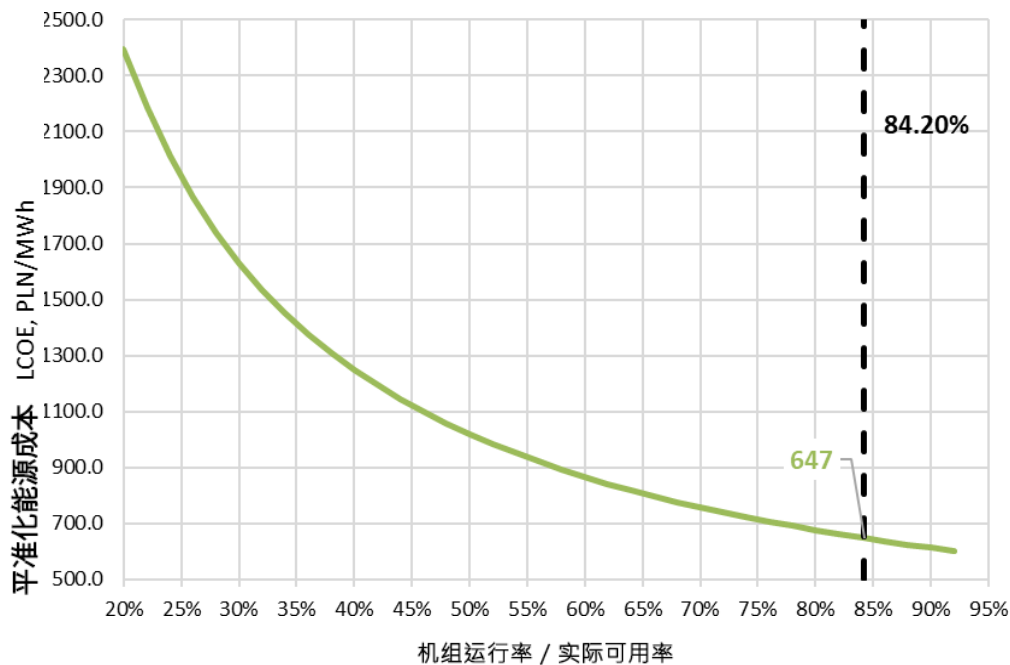


图44 敏感性分析结果——机组可用性

34 IAEA, 第78号状态报告——进化型核反应堆 (EPR)

图表显示了LCoE指标对发电量的强烈依赖性，在可用性极低的情况下，发电成本甚至会超过2000 PLN/MWh。

此外，还对4%-10%范围内的WACC折现率进行了敏感性分析。图中标注了假设的WACC=6.98%。

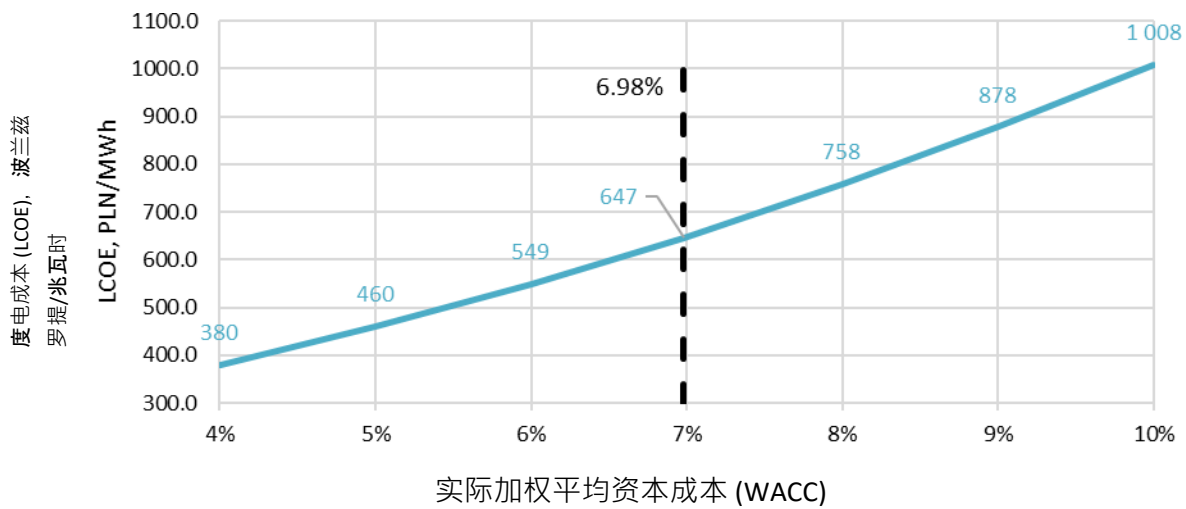


图45 折现率变量敏感性分析结果

WACC的变化对LCoE影响很大，但实际上其变化并不简单，取决于该国的许多宏观和微观经济因素。

7.6. 经济性分析总结

- 根据建模假设，EPR-1600技术在多尔纳奥德拉地区的LCoE成本约为647/656 PLN/MWh（棕地与绿地对比）。
- 在投资过程中利用现有基础设施（brownfield）可使LCoE降低约10 PLN/MWh。
- LCoE结构显示，资本成本是主要成本构成部分——约占75%。
- 敏感性分析表明，该项目对投资支出的变化最为敏感。折现率（WACC）也是一个重要参数。核燃料价格对盈利指标的影响微乎其微。
- 确保机组在市场上的适当生产率至关重要，因为随着机组可用性的下降，发电成本将急剧上升。
- 在设定LCoE水平的情况下，此类投资的实施必须基于保证适当水平的收入，例如通过差价合约，以确保投资支出的回报。

8. 分析投资方案所涉核电机组管理与运营所需能力（基于 6号研究任务所确定的能力要求基准）

从煤炭技术向核能技术（英语：‘Coal-to-nuclear’ - C2N）的能源转型需要改变技术和工程人员的结构。在此过程中，通过利用煤炭发电厂员工在核电站的技能，也可为经济和社会创造附加价值。

合理实施的发电厂转型过程可能带来以下积极效果：

- 无需裁减大量员工；
- 无需招聘大量新员工；
- 部分员工无需搬迁住所。

C2N转型对燃煤电厂员工的主要负面影响和风险包括：

- 转型过渡期内失业；
- 需要接受再培训；
- 需要获得新资质。

燃煤电厂向核电厂的转型还导致某些专业人才需求减少，同时需要招聘具备新专业技能的人才。

因此，合理规划C2N转型方案时，还应考虑如何利用燃煤电厂的技术工程人员队伍。

确定工程技术人员所需能力扩展或获取程序时，可首先明确现有规划中的发电厂及机组人员结构。发电厂或核电站的雇佣结构决定了目标人力资源及其能力配置。相关文献提供了员工职业清单及各类职位所占比例³⁵。结合总雇员人数，这些数据有助于确定各职业的目标雇佣结构。同样，对于燃煤电厂，也可以获得职业清单及其所占比例。通过直接比较特定地点的数据，可以评估直接转岗的可能性，通常只需略微拓展技能即可实现。

为制定扩充或获取现代化发电厂及发电机组工程技术人员所需能力的程序，本文列举了若干案例研究，其核心在于确定需要全新资质或需接受再培训的岗位及岗位数量。同样，也确定了煤炭发电厂中那些因需要完全转岗而无法在新发电厂或核电机组中找到职位的员工的岗位和职位数量。

基于这些分析，可以更详细地考察核电站关键岗位的职权范围，并确定培训或转岗的可能性。

³⁵ 汉森J、詹森W、沃贝尔A、斯托夫N、比格尔K、金T、贝尔斯R、奥米塔奥姆F：《研究将退役燃煤电厂改建为核电站的益处与挑战》。系统分析与整合；修订版2 为美国能源部准备 2022 年9月13日；INL/RPT-22-67964

在此方面，也可提出继续培训或转岗培训的建议路径。

8.1. 扩充或获取现代化发电厂和能源单元所需工程技术人员能力的程序中最重要要素

在核电站或核反应堆中利用电厂或燃煤机组工程技术人员的资质，可带来诸多经济和社会效益。通过合理制定新电厂所需资质的扩展或获取程序，即可实现这些效益。

在设计流程时需要考虑的最重要问题包括：

- 确定新电厂或机组所需岗位；
- 确定新电厂或机组各岗位的职业数量；
- 确定即将关闭的发电厂或机组的岗位；
- 确定被拆除发电厂或机组中各个岗位的职业数量；
- 确定新建机组或电厂岗位及职位的建立时间表；
- 确定电厂或燃煤机组岗位及职位的撤销时间表。

基于上述信息，可确定被撤销和新建单位的岗位与职位矩阵。该矩阵有助于确定以下类型的岗位与职位：

- 需要少量或完全不需要 需要扩大员工能力范围；
- 可在相对较短的时间内进行转岗培训或获得新能力；
- 必须进行全面转岗培训的岗位。

核电站或发电厂的退役与投运时间表可为该流程提供补充，例如在建造新发电厂或机组期间，为员工指明可能的职业发展路径及提升专业能力的机遇。

8.2. 核电站雇员最多的岗位汇总

雇员最多的岗位汇总可确定关键岗位的需求。分析首先确定了核电站雇员最多的十个岗位（按雇员数量排序）的职业数量

（1GW发电量）（表21）。数据基于[9]编制。该来源指出：

在基于10个小型模块化反应堆（SMR）建造的现代化核电站中，直接雇佣岗位为341个。该数据与同样为1GW发电能力的燃煤电厂将裁撤的岗位数量进行了对比。在此情况下，假设直接雇佣岗位总数为145个。

表21 核电站最常见职位汇总

燃煤发电厂			职位名称	核电站		
雇员比例	1GW发电厂岗位数量	职位百分比累积		雇员比例	1GW的装机容量1GW	职位比例递增长
0.31	-0.45	0.31	核工程师	13.07	44.64	13.07
0.31	-0.45	0.62	核反应堆运营商 核反应堆	10.96	37.44	24.03
0.52	-0.75	1.14	安全警卫 安全	10.96	37.44	34.98
0.62	-0.9	1.75	核技术人员	7.17	24.48	42.15
4.33	-6.3	6.09	一线生产和运营管理人员 运营人员	5.06	17.28	47.21
5.37	-7.8	11.46	电气和电子设备维修工、发电厂、变电站和继电器	3.06	10.44	50.26
0.52	-0.75	11.97	培训与发展专员 发展	2.85	9.72	53.11
4.64	-6.75	16.62	电气工程师	2.85	9.72	55.95
0.83	-1.2	17.44	建筑与工程经理 建筑与工程	2.74	9.36	58.69
3.20	-4.6	20.64	机械师 工业	2.74	9.36	61.43

通过数据分析可以发现，上述十个岗位占核电站总岗位数的61%。而相同岗位在燃煤电厂仅占约21%。这些岗位包括：核工程师、核反应堆操作员、安全警卫、核技术员、培训与发展专家；建筑与工程经理，而在燃煤电厂中，这些职位的比例不到1%。可以推测，这些职位几乎全部需要从核电站外部招聘人员，或者从燃煤电厂招聘经过全面培训的人员。

由于核电站总岗位数量较多，部分岗位的岗位编制可从燃煤电厂整体转移至核电站。具体岗位包括：生产和运营一线主管；电气和电子设备维修工、发电厂、变电站和继电器维修工；电气工程师；工业机械维修工。

8.3. 燃煤电厂雇员最多的岗位汇总

确定工程技术人员使用程序时，汇总燃煤电厂雇佣人数最多的岗位也有助益。与前文核电站岗位需求分析类似，可确定核电站无法吸纳或需要完全或部分再培训的岗位类别。

分析中筛选出十四个工作岗位数量最多的岗位（表22）。研究数据基于³⁶

表22 燃煤电厂最常见的工作岗位汇总

燃煤发电厂			职位名称	核电站		
雇员比例	职位数量 1GW	全职工工比例 累计		雇员比例	职位数量 1GW	累计百分比
17.44	25.4	17.44	发电厂运营商	0.63	2.2	0.63
7.02	10.2	24.46	电力线路安装工和维修工 电力线路	0.74	2.5	1.37
5.37	7.8	29.82	电气和电子设备维修工、 发电厂、变电站和 继电器	3.06	10.4	4.43
4.64	6.8	34.47	电气工程师	2.85	9.7	7.27
4.33	6.3	38.80	一线生产和运营管理人员 运营人员	5.06	17.3	12.33
3.61	5.3	42.41	服务代表 客户	0	0	12.33
3.20	4.7	45.61	机械师 工业	2.74	9.4	15.07
3.10	4.5	48.71	一线经理 机械师、安装工	2.53	8.6	17.60
2.37	3.4	51.08	控制系统和阀门安装工及维修 工，不包括机械门 机械门	0.21	0.7	17.81
2.06	3	53.15	电气工程师	1.69	5.8	19.49
2.06	3	55.21	电力分销商和 电力调度员	0.32	1.1	19.81
1.86	2.7	57.07	总经理和 运营经理	0.74	2.5	20.55
1.75	2.55	58.82	项目管理专员和业务运营专员 , 所有其他人员	2.11	7.2	22.66
1.44	2.1	60.27	管理分析师	0.63	2.2	23.29

在燃煤电厂中，14个岗位占总岗位数的60%。这些岗位约占核电站雇员总数的23%。尽管在这些职业群体中

³⁶ Hansen J., Jensen W., Wrobel A., Stauff N., Biegel K., Kim T., Belles R., Omitoomu F.: 《研究将退役燃煤电厂改建为核电站的益处与挑战》。系统分析与整合；修订版2 为美国能源部

准备 2022 年 9 月 13 日；INL/RPT-22-67964

某些岗位在核电站中仅占很小比例，这是由于核电站与燃煤电厂员工数量存在显著差异，因此该群体中只有部分人员能在核电站获得职位。这尤其适用于：发电厂操作员、电力线路安装和维修人员 客户服务代表 控制系统和阀门安装与维修人员（机械门除外） 电力分销商和调度员

8.4. 核电站最缺岗位与 燃煤电厂最剩岗位对照表

通过比较燃煤电厂和核电厂各岗位的职业数量，可以确定其缺口和冗余。列出燃煤电厂职位过剩最严重的岗位以及核电厂职位短缺最严重的岗位，有助于评估部分员工转岗到新电厂工作的可能性。表23列出了1GW核电站和燃煤电厂最重要的岗位及其职位数量。

表23 燃煤电厂与核电厂主要岗位缺员与超员情况汇总

核电站	短缺	过剩	燃煤电厂
核工程师	44.19	23.19	发电厂操作员
核反应堆操作员	36.99	7.68	电力线路安装与维修人员
保安人员	36.69	5.25	客户服务代表
核技术人员	23.58	2.73	控制系统和阀门安装与维修人员（机械门除外） 机械门
一线生产和操作员工主管 运营人员	10.98	1.92	电力分销商和调度员
培训与发展专员	8.97	1.8	运营工程师及其他建筑工人操作员 设备
建筑与工程经理 工程	8.16	1.05	水处理和污水处理厂及系统操作员 水和污水
机械师 工业机械	4.71	0.9	固定工程师和 锅炉操作员
项目管理专员和业务运营专员，所有 其他	4.65	0.78	焊工、切割工、钎焊工和钎焊工
各类一线经理、 保安人员	4.53	0.75	燃气站操作员
一线机械师、安装工和 维修人员	4.14	0.6	会计、审计和审计人员
工业工程师	4.02	0.6	巴士和卡车机械师以及柴油发动机专家 柴油发动机
安全与 职业卫生	3.57	0.6	校准技术员和工程师 以及工程技术人员

			工程技术人员，除制图员外， 所有其他人员
个人服务经理，所有其他；娱乐和休闲 经理，除赌博和经理外，所有 其他	3.42	0.6	建筑业经理
电气工程师	2.97	0.6	卡车和拖拉机操作员 工业
办公室职员，一般	2.91	0.6	计量表读数员，公用事业
电工	2.76	0.6	移动重型设备机械师 机械师，不包括发动机
生产经理	2.76	0.6	液压工、管道安装工和 蒸汽设备安装工
生产、计划和运输官员	2.76	0.45	调度员（不包括警察、消防员和急救 人员） 急救
电气和电子设备维修工、 发电厂、变电站和变压器	2.64	0.45	电气和电子制图员
培训与发展经理	2.37	0.45	助理——安装、维护和修理工人 安装、维护和维修
化学家	2.07	0.45	律师
化学技术员	1.92	0.45	维护人员， 机械
机械工程师	1.86	0.45	设备和系统操作员
行政服务经理 及设施	1.83		
行政秘书和 行政助理	1.62		
工程师，其他所有	1.56		
技术作者	1.44		
合规专家	1.41		
安全分析师 信息	1.35		
工业工程师、技术员和 技术员	1.29		
检验员、测试员、分拣员、 取样员和称重员	1.14		
化学工程师	1.08		
危机管理总监 危机	1.08		
环境与安全科学技术人员 保护技术员，包括卫生服务	1.08		

根据所提供的数据可以看出，在燃煤电厂中，最大的岗位类别是电厂操作员（负责控制、操作发电设备及辅助系统），而核电站中并不存在与其对应的岗位。

在这些岗位上，人员具备与机器、设备和装置相关的专业技术知识和技能，而核电站中这类设备数量有限甚至根本不存在。鉴于其技术教育背景及相对较多的岗位数量，可考虑让他们接受补充培训，以便在完成实习后从事与反应堆操作相关的技术和工程岗位工作。这种转岗途径相当漫长，且可能伴随薪资暂时降低（再教育和实习期间），因此更适合年轻员工。在燃煤电厂转型为核电厂的过程中，往往存在一段较长的过渡期：燃煤电厂已停止运行，而核电厂尚未投入运营。一方面，这为部分员工的转岗提供了时间；另一方面，由于期间缺乏生活来源（培训期间就业可能困难），这种过渡期可能难以接受。

分析还揭示了另一类人群——电力线路安装工，该岗位的职业数量相对于燃煤电厂而言存在过剩。这些岗位通常由受过电气培训的人员担任，他们可以从事电工、电气和电子设备维修工或电气工程师等可能存在人员短缺的职位。

8.5. 核电站部分岗位信息汇总

在文献中可以找到大量关于核电站和核工业领域工作岗位的信息汇总。

在³⁷中，列出了包含职业分类特征的文献综述，其中可找到与核能领域相关的职业分类。该综述特别列举了若干主要在核能领域具有重要意义的国家所编写的报告。这些列表在职位名称及其特征方面存在显著差异，这可能是由于不同国家往往基于自身在该领域的经验而制定的。

在³⁸中列出了与核能领域相关的工作岗位，包括核电站运营岗位。选定岗位按初始资质、能力（按知识技能和责任范围划分）、额外培训和发展进行描述。在上述领域中，技术、运营、业务和人事问题被进一步区分开来。

根据³⁹，可以得出结论：就职位数量和培训需求而言，重要的职位包括核工程师和核反应堆操作员。这些职位将在后续子章节中进行更详细的描述。

8.6. 核工程师

根据标准职业分类（SOC）⁴⁰——该分类是职位与岗位矩阵分析的基础——该职位主要从事核工程项目研究，或将核科学原理与理论应用于核能释放、控制与利用以及核废料储存相关问题。

³⁷ ERIKSSON, A. 和 ERIKSEN, B. 《核能领域的职位分类与分类法》，欧洲委员会，佩滕，JRC132572

³⁸ C. Chenel Ramos, 《核能岗位分类法》最终报告，EUR 29126 EN，欧盟出版办公室，卢森堡，2018年，ISBN 978-92-79-73842-5，doi 10.2760/090414，JRC110868

³⁹ Hansen J., Jensen W., Wrobel A., Stauff N., Biegel K., Kim T., Belles R., Omitoomu F.: 《研究将退役燃煤电厂改造为核电站的益处与挑战》。系统分析与整合；修订版2 为美国能源部准备 2022年9月13日；INL/RPT-22-67964

⁴⁰ 标准职业分类手册 总统行政办公室；管理与预算办公室；美国，2018年

根据⁴¹，该职位可从职能、知识和技能方面进行描述。

职能：

- 负责在严格遵守核安全法规的前提下，对所有涉及新燃料和乏燃料的操作进行堆芯计算。
- 计算核反应堆堆芯和乏燃料池。
- 根据授权或许可的燃料运行限值确定反应堆运行限值。符合新燃料的燃料规格要求。新燃料的验收与检查。运行期间对反应堆堆芯状态进行监测与数据采集。
- 进行计算以确保安全（核心/反应堆冷却系统在许可限值内的运行条件）和效率（中子通量分布、核心燃耗速率）。
- 确保反应堆堆芯操作符合规范。
- 燃料装载设计（燃料运动、燃料组件在反应堆堆芯/乏燃料池中的定位）。
- 在运行条件变化时对反应堆堆芯行为进行建模和预测。
- 监督燃料补充操作期间与核燃料相关的活动。
- 编制反应堆启动所需的工作文件（程序、计划、说明）。
- 准备并评估反应堆启动前的堆芯测试。
- 收集数据并监测反应堆堆芯和压力容器的辐射损伤情况。
- 核材料（即燃料组件、堆芯监测仪器）及其他与堆芯相关的设备（如燃料源、燃料接口、调节棒）的监测、数据采集与控制

职位要求 知识（认知能力） 欧盟资格框架（EQF）级别（1-8）

反应堆物理论 7 核安全原则与要求 6 安全文化 6 工程制图、图纸与示意图 6 辐射防护 6 核物理学 6 核安全法规 6 核工程学 6 堆芯内外核设备（裂变室、中子通量监测） 6 反应堆设计数值方法 6 热水力设计与分析 6 核燃料（热限制、运行限制等） 6 启动前堆芯测试 6 反应堆堆芯运行、限制和设定点 6 核电站：反应堆基础、反应堆和电站工艺系统、辅助工艺系统、电离辐射、热量产生和消除系统、蒸汽供应系统、核化学、测量与控制系统、电气系统 5 国内与国际规范及标准 5 工业安全 5 运行经验 5 基本测量仪器与程序 5 目视检查 5 材料学与辐射损伤 5 工作安全与个人防护措施 4 质量保证与控制 4 项目管理、规划方法与工具 4 信息通信技术知识 4 技术文本写作 4 核安全 4

⁴¹ C. Chenel Ramos, 《核能职业分类法》最终报告, EUR 29126 EN, 欧盟出版办公室, 卢森堡, 2018年, ISBN 978-92-79-73842-5, doi 10.2760/090414, JRC110868

技能（技术和职能能力） EQF 等级（1-8）

利用工程数据和技术文档并进行解读。7 规划、协调、实施和监控项目活动。6 确保工程规范和标准的实施。6 识别可能与其他相关学科产生的影响和交互作用。6 进行反应堆堆芯分析和燃料配置设计。6 绘制堆芯和乏燃料池中燃料组件的位置图。6 计算中子分布流图。6 计算临界性和中子学。6 收集数据并监测堆芯工作条件。6 确定反应堆工作极限。6 监测核燃料安全运行参数。6 监测反应堆堆芯性能。6 预测/模拟/分析反应堆堆芯行为。6 设计反应堆堆芯操作操作。6 制定堆芯操作程序。6 接收并检查新燃料。6 制定/验证新燃料接收和检查程序。6 协助制定新燃料的技术规范。6 解读堆芯监测仪器的读数。6 使用并更新反应堆燃料组件、连接件、调节棒、源等数据库。6 设计反应堆堆芯测试程序，分析并监控结果。6 确保符合法定法规和QSE组织要求。5 制定并提交要求规范、技术规范、程序和报告。5 识别安全要求。5 使用计算机辅助技术收集技术信息。4 监控并维护安全的工作环境。4 进行工作分析、分解活动并分配任务。4 评估绩效，确定改进或纠正绩效的措施和指标。4 维护核材料

8.7. 核反应堆操作员

根据标准职业分类（SOC）的分类⁴²，该职位的主要职责包括操作或控制核反应堆；移动控制棒；启动和停止设备，监控和调节控制元件，并在日志中记录数据；必要时实施应急程序；能够应对异常情况，确定原因并建议纠正措施。该职位也被称为：核控制室操作员、核反应堆操作员、核电站操作员。

该职位可从职能、知识和技能三个方面进行描述。

职能：

- 负责反应堆设施安全运行的所有方面
- 确保并控制反应堆设施按照技术规范要求安全、无故障地运行（辐射状况、化学环境、技术限制和条件）
- 全面监督反应堆装置及其辅助系统的所有运行活动，并直接操作设备和系统的控制元件

⁴² 标准职业分类手册 总统行政办公室；管理与预算办公室；美国，2018年

- 监测和控制可能影响反应堆反应性的堆芯、反应性和相关系统
- 确保并控制所有与反应堆设施运行相关的活动严格遵守核安全和辐射防护要求
- 向单位值班经理报告反应堆设施的运行状态和/或发生的事件
- 协调维护和测试活动，并在维护后启动设备
- 在操作过程中监控指定设备的参数，对系统或设备异常作出响应，诊断原因，建议或实施纠正措施，并报告事件
- 负责记录并持续更新运行日志
- 在燃料供应中断期间，协调并监控受控区域内的行动
- 在异常或紧急情况下，严格遵循单元值班经理的指示，遵循应急操作规程和内部应急计划
- 在职责范围内与组织其他部门合作
- 负责实施操作程序，如监控启动和关闭操作，包括定期测试相关设备

职位要求：知识（认知能力）欧洲资格框架（EQF）等级（1-8）核工程：反应堆物理学、核燃料热限制、核电站系统、反应堆热交换与流体流动 6 工作安全与个人防护措施 6 操作经验 6 核电站运行：反应堆系统运行：反应堆启动、正常运行、过渡运行、紧急运行、运行参数测量、电站动态与控制、反应堆堆芯运行、仪器与应用 6 核安全 6 物理与化学理论：热力学、流体力学 5 应用技术与工程：发电、能量转换、机械工程、电气工程、电力系统运行、电气设备、能量转换、传感器、测量、信号处理、仪表与控制、管道系统、泵和涡轮机、液压和气动装置 5 技术图纸和示意图 5 核安全文化 5 应急准备 5 核能科学 理解复杂的法规和程序 5 工厂化学 4 国家和国际法规、安全操作相关法规、准则和程序 4 辐射防护 4 防止人为错误的技术 4 公司程序 4 事故分析与事故模拟 4 风险评估 3 材料科学 3

技能（技术和功能能力）欧洲资格框架（EQF）级别（1-8）

确保能源设备在安全且经济高效的条件下运行，符合技术规范 and 操作规程。6 识别发电厂运行中的异常状况并及时上报。6 监控设备和技术系统的状态。6 预测系统和组件的运行结果，并采取可能需要的纠正措施。6 确定系统绩效指标或指标，并预测条件或操作的变化将如何影响结果。6 使用安全有效的沟通技巧传达指令。6 执行操作和应急计划及程序。6 操作和监控计算机控制设备。6 利用记录仪和显示器信息调节运行参数。6 阅读和

解读技术图纸和示意图。5 编制技术报告和操作记录。5 使用测量和测试仪器检查设备状态。5 根据标准操作规程和收到的指示纠正异常状况。5 维护并更新维修日志、追踪系统和报告系统。4 为核安全文件编制提供数据支持。4 监控并维持安全的工作环境。4 执行目视检查。4 遵守法定规定和组织安全要求。4 为需求规格说明书的制定提供意见。4 使用指定软件操作计算机。4

根据⁴³条规定，该职位可描述为：

基本资格：工程或相关科学领域的学位和/或严格的核能培训课程以及丰富的经验。

职位描述

反应堆操作员负责操作电站控制装置、监控其运行状况、指挥设备直接操作，并在启动、停机、功率调整、紧急及事故情况以及特殊配置下执行许可操作。反应堆操作员主要在控制室操作电站控制装置。

能力要求（技术能力（T）、监管能力（R）、商业能力（B）、个人能力（P））

反应堆操作员应能够：

- 根据厂规操作电站控制装置。(T, R)
- 将理论知识应用于实际情况。(T)
- 分析发电厂设备的运行状况，并根据工厂规程和现有信息，对正常和异常情况采取纠正措施。(T, R)
- 运用工厂规程和技术规范，在正常、异常和紧急情况下采取适当措施。(T, R)
- 在不确定或意外条件下保持发电厂的安全状态。(T, R)
- 有效控制和协调下属及其他人员的行动。(R, B)
- 作为控制室轮班团队的有效成员开展工作。(B, R)
- 履行支持应急计划实施的职责。(R, P)
- 对工厂运营采取保守态度。(R, P)
- 与其他团队合作解决问题。(P, B)

反应堆操作员应理解：

- 反应堆操作员在反应堆活性管理和堆芯安全方面的概念、理念及职责。(T, R)
- 高级技术基础、工厂设计、系统理论及相互关系，这些是操作员负责的内容。(T)

43 《标准职业分类手册》总统行政办公室；管理与预算办公室；美国，2018年

- 工厂内各部门之间的关系——质量保证、工程、维护、培训、辐射防护。(T, B)
- 工厂管理相关的行政程序与监管要求。(T, R)
- 概率安全评估概念及关键组件在减轻事故影响中的重要性。(T, R)
- 公司程序、计划、政策以及行业指南和最佳实践。(T, R)
- 错误预防技术与人类效能工具。(T, B)
- 如何开展术前和术后简报。(T, B)
- 如何做出保守决策，将保护人员和公众的健康与安全作为最高优先级。(P, T)

推荐培训/CPD：(技术类 (T)、法规类 (R)、商业类 (B)、个人类 (P))：

- 高级技术基础，例如工厂系统描述和反应堆操作员理论。(T)
- 辐射防护。(T)
- 反应堆热力学。(T)
- 运行许可证和技术规范。(T, R)
- 模拟器培训：综合正常厂运、诊断、应急程序、事故响应及过渡工况。(T, R)
- 概率安全评估。(T, R)
- 安全分析报告。(R)
- 瞬态状态和事故的高级分析。(T, R)
- 减轻堆芯损坏的影响。(T, R)
- 错误预防技术与人类效能工具。(T, B)
- 团队合作。(P)
- 保守决策。(T, B)
- 核安全与安全文化 (T, R)
- 运营经验与应急计划。(T, R)
- 工作相关政策与程序 (T, R, B)

9. 核反应堆发电机组现代化改造与运营领域的组织与安全风险分析（基于研究任务3的成果，该任务为选定地点制定了核安全关键要求与建议）

9.1. 的法律要求

9.1.1. 核电站选址的一般要求

波兰法律规定了核电站选址的一般要求，旨在确保公众和环境的安全。2000年11月29日颁布的《原子能法》中的关键要求涉及核电站选址的评估、规划和选择。

9.1.1.1. 辐射安全与公众健康保护

核电站的选址必须确保民众在潜在事故（包括放射性物质泄漏）中获得最大程度的安全保障。选址应考虑降低民众受辐射风险，并满足国家及国际法规规定的辐射防护要求。

9.1.1.2. 地震与地质风险分析

核能法规要求核电站选址必须考虑所有可能的地质风险，如地震、山体滑坡、洪水或地表变形，这些都可能影响核设施的稳定性和安全性。必须进行详细的地质和地震评估，以最大限度地降低自然力量对设施运行和安全的影响风险。

9.1.1.3. 环境保护

核电站选址必须符合环境保护要求，这意味着必须进行全面的环境影响评估（EIA）。该评估将分析投资项目对空气、水、土壤、动植物的潜在影响。在环评过程中，还应考虑对可用于冷却反应堆的水资源以及当地气候和生态系统的影响。

9.1.1.4. 符合空间规划

核电站的选址必须符合当地的空间规划方案。规划过程需要与地方政府及相关公共行政机构合作，以确保投资项目符合当地条件。还应考虑对交通基础设施的影响、交通便利性以及可能的疏散需求。

9.1.1.5. 与人口密集区和关键基础设施的距离

核电站选址应远离人口密集区和关键基础设施。限制事故对周边环境的影响是首要任务，因此选址必须符合关于与居民区和战略设施最小距离的特定标准和法规。

9.1.1.6. 技术基础设施的可用性

要求还涉及运营核电站所需的适当技术基础设施的可用性，包括电力连接、用于冷却反应堆的水源、交通基础设施（公路和铁路）以及应急和通信基础设施。

9.1.1.7. 确保适当的物理保护水平

发电厂的选址必须能够为设施提供适当的物理防护，以抵御外部威胁，包括破坏活动、恐怖主义或空中袭击。法规要求采用现代化的防护和安全系统，以最大限度地降低外部因素带来的风险。

9.1.1.8. 与当地社区的合作及公众咨询

需要开展公众咨询和宣传活动，以说明电厂选址对周边环境的影响，并收集居民和利益相关方的意见。此类活动旨在提高选址过程的透明度，并为项目争取公众支持。

9.1.1.9. 遵守国际法规和国际原子能机构（IAEA）的规定

作为国际原子能机构（IAEA）的成员国，波兰必须遵守关于核设施选址与安全的国际标准和指南。在此背景下，需考虑风险评估、应急管理和环境保护方面的最佳实践。

综上所述，根据《原子能法》的要求，波兰核电站选址需经过详细分析，以确保最高安全水平、最大限度减少环境影响，并保障公众健康与安全。

9.1.2. 核反应堆设计和核电站的总体要求

2012年8月31日部长理事会关于核安全与辐射防护要求的条例（2012年法律公报第1048号）规定了波兰境内核设施（包括核反应堆）的设计、建造及运营的具体要求。这些要求旨在为民众、工作人员和自然环境提供最高水平的核安全和辐射防护。

9.1.2.1. 核安全基本原则

- - 深层防御原则：反应堆及整个核电站的设计必须遵循深层防御原则，即采用多重物理和组织屏障防止放射性物质释放。这要求建立预防、检测和缓解潜在事故影响的系统。
- - 事故防护：设计必须最大限度降低事故发生风险，并确保事故后果得到控制和限制，以防止对公众和环境造成严重影响。

9.1.2.2. 安全系统设计

- - 系统可靠性：所有安全系统（包括反应堆冷却系统）必须具备高可靠性。要求具备冗余性（关键部件的复制）和技术多样性，以防止因单点故障导致的事故。
- - 被动与主动系统：安全系统必须能够以被动方式（无需电力供应）和主动方式运行，以确保最高安全水平。
- - 安全停堆能力：设计必须考虑在紧急情况下能够安全、立即停堆，并确保停堆后长期散热。

9.1.2.3. 抵御外部和内部威胁的能力

- - 抗外部因素能力：核设施的设计必须确保能够抵御各种外部因素的影响，例如地震、洪水、极端天气、火灾以及飞机坠毁。
- - 内部威胁：项目必须考虑防范内部威胁，例如系统故障、内部火灾、爆炸以及可能的人为失误。

9.1.2.4. 辐射防护

- - 辐射暴露最小化：设计必须通过采用物理屏障、适当的辐射防护和监测系统，确保工作人员和公众的辐射暴露最小化。
- - 通风系统：必须设计符合现行标准的通风系统，具备空气污染过滤功能，并能控制放射性物质向大气中的释放。

9.1.2.5. 设施监测与控制

- - 监测系统：电站设计必须包含先进的反应堆运行参数监测与控制系统，包括故障检测和安全违规检测系统。
- - 自动化控制系统：建议采用自动化控制系统，以便快速发现异常情况并采取相应的纠正或预防措施。

9.1.2.6. 物理安全与设施保护

- - 物理防护：设施设计必须提供足够的防护，防止未经授权人员进入、蓄意破坏或外部攻击。
- - 综合安防系统：包括监控、报警系统和访问控制，以防止可能危及设施安全的蓄意行为。

9.1.2.7. 事故与紧急情况应对措施

- - 应急处理方案：电站设计必须包含详细的内部和外部应急处理方案，并预见到可能需要外部服务参与救援行动的情况。
- - 人员疏散与安全系统：考虑疏散通道、人员保护程序及其他确保将潜在事故影响降至最低的要素。

9.1.2.8. 放射性废物管理要求

- - 安全储存废物：项目必须考虑安全收集、储存和管理核电站运行过程中产生的放射性废物的系统。
- - 减少废物量：应努力减少放射性废物的产生量，并按照规定进行适当的储存和处理。

9.1.2.9. 组件和材料的技术资质

- - 符合规范与标准：所有部件和组件的设计与制造均须符合国际核安全规范与标准。
- - 认证与测试：要求对所用材料和设备进行相应的测试、认证和质量验证。

2012年8月31日颁布的条例对核设施设计提出了广泛的技术要求，旨在确保最高水平的安全性、辐射防护以及对各种威胁的抗风险能力。每个项目都必须以综合方式进行设计，同时考虑技术特性、辐射安全、风险防护和危机管理。

9.2. 奥德河下游核电站

9.2.1. 的总体特征

下奥德河发电厂是位于西波美拉尼亚省格里芬附近新恰尔诺夫的一座能源综合体。作为波兰最大的系统发电厂之一，多年来在国家电力系统中发挥着关键作用。下奥德河发电厂目前隶属于波兰能源集团（PGE Polska Grupa Energetyczna）。该发电厂多年来一直依赖燃煤机组，但近年来经过现代化改造，扩大了天然气发电能力。该发电厂已1974年投入运行。

经过现代化改造和新建燃气轮机组后，总装机容量约为1366兆瓦。下奥德河发电厂最初由八台燃煤机组组成，每台机组容量约为200兆瓦。在现代化改造计划实施过程中，部分旧机组被关闭，其余机组则作为备用机组保留。2021年，两台现代化燃气轮机组投入运行：9号机组和10号机组，总装机容量达1367兆瓦。这些机组采用天然气作为燃料，与传统燃煤机组相比，显著提高了能源效率并减少了二氧化碳排放。

PGE计划进一步发展和现代化下奥得河地区的基建，包括可能增加低排放技术的比例，以及发展能源存储能力，这是实施国家能源转型政策的一部分。

在 DESIRE 项目背景下，下奥得河核电站的核能改造准备度排名位居前列。

9.2.2. 核电厂改造的安全性评估

本分析假设将多尔纳奥德拉电厂的燃煤机组替换为欧洲压水反应堆（EPR）。此类改造的安全评估要点总结如下。

9.2.2.1. EPR反应堆的技术安全性

EPR反应堆是一种先进的第三代+压水反应堆（PWR），其设计符合极高的安全标准。该反应堆采用被动安全系统以及冗余且独立的主动安全系统，从而提高了可靠性。EPR反应堆配备双层安全壳，在发生严重事故时可最大限度降低放射性物质泄漏风险，同时保护设施免受外部威胁，如恐怖袭击或飞机撞击。该设计还为应对所谓的设计外事故提供了额外解决方案。其中最重要的系统之一是所谓的堆芯捕集器：当堆芯熔毁时，EPR反应堆具有捕获和控制熔毁堆芯冷却的系统，从而最大限度地降低放射性物质泄漏到设施外的可能性。

9.2.2.2. 位置安全

下奥德河核电站位于地震活动相对较低的地区，这对核电站建设而言是个有利因素。但必须进行详细的地质和水文调查，以确保该地区符合核安全要求。EPR反应堆需要大量冷却水。奥得河畔的选址确保了水源供应，但需评估水位变化或干旱可能对冷却系统造成的影响风险。

9.2.2.3. 辐射安全方面

向核能技术的过渡需要制定详细的辐射防护计划。发电厂必须符合严格的辐射标准，其运行应受到持续监测，以确保放射性排放不超过允许值。对于核电站，必须在设施周围划定保护区，实施额外限制。这可能需要调整下奥得河流域的基础设施，并制定适当的疏散计划和应急响应程序。

9.2.2.4. 应急规划区

对于计划在多尔纳奥德拉核电站原址投运的配备EPR反应堆的核电站，其应急规划区应依据国际原子能机构（IAEA）的建议及波兰法律法规进行划定。关键应急规划区包括直接行动区（PAZ）和外部规划区（UPZ），旨在保障事故发生时民众的安全。

9.2.2.5. 直接行动区（PAZ - Precautionary Action Zone - 预防行动区）

目标：PAZ区域旨在通过快速实施预防措施（如疏散、留在室内或分发碘化钾片）来确保对民众的即时保护。

应急准备区半径：通常为核电站周边3至5公里范围。根据国际原子能机构（IAEA）的指导方针，应急准备区应设计为能够快速响应紧急情况，并最大限度地减少对民众和环境的潜在影响。假设该区域半径为3公里，具体情况如图所示。

值得注意的是，格里芬诺市位于该区域边界，且该区域还延伸至德国境内。

9.2.2.6. 外部规划区（UPZ - 紧急防护行动规划区）

目的：UPZ区域涵盖在辐射威胁情况下可采取进一步防护措施的区域，例如临时屏蔽、出入管制、辐射监测或必要时的撤离准备。

区域半径：对于EPR反应堆，根据国际原子能机构的建议，典型UPZ区域半径为电厂周边15至30公里。具体半径取决于风险分析和地形特征（如人口密度、地形条件、水文及气象条件）。

9.2.2.7. 长期防护行动规划区（LPZ）

目的：涵盖可采取长期保护措施的区域，例如人口迁移或长期环境监测。

区域半径：可涵盖距电厂30至100公里范围内的区域，具体取决于地点特性、预期事故情景以及对潜在环境和健康影响的评估。

9.2.2.8. 下奥得河流域划分区域的具体说明

考虑到下奥得河地区的特殊性，应考虑格里芬和什切青周边地区的人口密度、与奥得河相关的水文条件以及与波兰边境的接近程度德国。

这可能影响应急行动规划的细节。应急规划区的划定必须符合波兰《原子能法》的规定和国际原子能机构的建议。必须考虑与德国当局的跨境沟通程序，因为可能的应急行动可能会影响边境地区。

9.2.2.9. 应急规划的准备步骤

制定应急响应计划：PAZ、UPZ和LPZ区域必须纳入应急响应计划，该计划应规定相应的防护程序和应对措施。必须建立快速预警系统、公众信息发布机制以及救援部门与公共行政机构之间的协调机制。还必须组织模拟演习，使当地社区和部门做好准备，在发生事故时能够正确应对。

9.2.3. 放射性废物管理

引入EPR核反应堆将产生放射性废物，这些废物需要适当的储存和管理。可能需要建造专门的废物储存设施，而规划其长期运营时必须考虑高安全标准。放射性废物与传统燃煤电厂的污染物不同，这给其储存的安全性和责任带来了新的挑战。

9.2.4. 应对紧急情况

像EPR这样的核电站需要复杂的危机管理程序。对于下奥得河地区，应制定新的应急管理计划，包括与地方政府、消防部门、警察和民防部门的合作。向核能技术的转型需要对电厂员工进行核反应堆操作和安全程序方面的培训，这对现有团队来说可能是一个挑战。

9.2.5. 安全网络安全

EPR核反应堆与其他现代核装置一样，采用先进的控制和自动化系统。因此，必须确保高水平的网络安全，以应对潜在的网络攻击威胁。

9.2.6. 安全的社会与政治层面

在现有的下奥德拉核电站原址建造核反应堆可能会引发社会各界的各种反应，从赞同到反对。关键是要确保与当地社区进行充分沟通，向其通报计划以及核电站带来的好处和风险。让当地社区参与进来，建立对话机制，可以对公众接受度和设施的安全运行产生积极影响。

9.2.7. 核材料运输安全

向核能技术的转型需要安全运输核燃料和放射性废物。必须制定物流系统和运输程序，以防止与危险材料运输相关的任何风险。

9.3. 总结

总而言之，用EPR核反应堆取代多尔纳奥德拉电厂的燃煤机组，在安全方面面临诸多挑战，但也为向低排放、现代化能源转型创造了潜力。EPR反应堆凭借其先进的安全系统，是最安全的反应堆之一，但需要采取全面的规划和实施方法，以确保技术、环境和社会层面的全面安全。

从纯粹的安全角度来看，反应堆的选择及其选址是可行的。跨境协调过程存在较大风险。

10. 对投资过程中法律及立法障碍的诊断

尽管具有潜在效益，但实施“煤转核”类投资（即用核能替代发电领域的煤炭能源）可能面临诸多法律和立法障碍。行政程序的复杂性，以及现行法规与这类项目要求的不匹配，可能会严重阻碍项目的实施。在“煤转核”投资的初步可行性研究中，关键是要了解获得建设许可所需的程序路径，并识别主要的法律和立法障碍。

10.1. 核设施建设许可的程序

路径说明核设施建设许可是启动和开展施工的关键文件。在提交申请前，投资者必须准备符合法律要求的项目文件，并获取一系列正式文件和行政决定。对于核设施，该流程既包括标准建筑程序，也包含额外程序，以满足核活动相关的特殊要求。

标准建筑程序基于1994年7月7日颁布的《建筑法》（《法律公报》2024年第725号），以下简称《建筑法》。该法律规范了建筑过程，包括投资准备、取得建筑许可、实施建筑工程、移交建筑物使用以及保持其良好技术状态。该法规定了投资流程参与者的权利和义务，指明了需要建筑/拆除许可或申报的设施，描述了获取许可的程序以及公共行政机关的运作原则。该法还明确了文件要求设计和建筑过程中必要的正式手续。

提交建筑许可申请所需的技术文件包括三个部分：建筑设计两部分——土地开发设计和建筑设计。第三部分，即技术设计，应在施工前准备好并存放在施工现场。所有建筑设计文件必须由具备相应资质的工程师签署，且签署范围须与文件内容相符。

核能程序路径及其附加要求与简化措施源自2000年11月29日颁布的《原子能法》（公报2024.1277号），以下简称《原子能法》，以及2011年6月29日颁布的《核能设施及配套投资准备与实施法》（法律公报2024年第1410条），以下简称《特别法》。负责核能领域决策的机构是国家原子能局（PAA），由PAA局长代表。

在核设施建设过程中，首先需要获得且最重要的决定之一是由能源主管部长根据投资者申请作出的**原则性决定**。该文件规定了核能设施建设项目的许可参数，也是申请后续行政许可（包括核能设施建设项目选址许可及其他设施筹建、运营和使用所需许可）的基础。基本决定旨在保障公共利益，特别是实现国家政策目标，如能源政策，并确保国家安全（《特别法》第3a条）。

基本决定使投资者能够提交**环境条件决定**（简称：DoŚU）的申请，该决定是获得核设施建设许可的必要环节。

DoŚU适用于可能对环境产生重大影响的项目以及可能对环境产生重大影响的项目。其颁发规则由2008年10月3日颁布的法律规定。

关于环境信息公开、环境保护、公众参与环境保护及环境影响评估的法律（公报2024.1112）。环境影响评估旨在确保拟建项目对环境的负面影响最小化。如果投资项目可能对环境产生重大影响，在作出环境条件决定之前，将进行环境影响评估。评估依据是申请人编制的环境影响报告。该报告呈现投资项目对环境的影响数据，涵盖施工方法和运营阶段，并考虑噪音、排放及对居民的影响等因素。

对于属于第三类地质工程类别的能源设施（如核电站），还需编制**地质工程文件**（简称DGI），该文件将作为技术设计的一部分附于建筑设计方案中。编制DGI的必要性源于2011年6月9日颁布的《地质与采矿法》（法律公报2024年第1290条）及其配套法规，包括环境部长于

2016年11月18日关于水文地质文件和地质工程文件的法规（官方公报2016年第2033号）以及交通、建设与海洋经济部部长2012年4月25日关于确定建筑物地质条件的条例（2012年法律公报第463号）。

地质工程文件（DGI）应独立于地质技术意见书、地基勘察文件及地质技术设计书的编制义务之外。根据《地质与采矿法》规定，DGI需经主管机关批准。该流程始于制定地质工程设计，该设计需经协商并以行政决定形式批准。批准后，在提交现场施工意向书后，将实施计划中的地质工作（最早在批准后两周内）、实验室研究及编制DGI所需的分析。文件编制完成后，应提交审批申请。该事项的审批决定由县长（在县地质学家的协助下）或省长（在省地质学家的协助下）作出。

投资流程的下一步是获得由当地省长签发的**核能设施建设选址决定**。根据《特别法》第15条第6款，在缺乏现行《地方空间规划》的情况下，该决定可替代标准程序（针对非核能投资）中要求的建设条件决定。投资选址决定赋予了使用该项目实施所需土地的权利。该决定包括项目涉及的房地产标识、保护第三方利益的要求以及投资实施条件，如技术、环境、保护和消防要求。申请该决定时，必须附上《特别法》第5条所指其他机构的多项意见。

核能设施投资选址决定的必要条件是事先获得环境条件决定。值得注意的是，该决定可由投资者在核能设施投资选址决定的审批程序中提交。

除基本决定和选址决定外，投资者还应获得**从事涉及核设施建造的风险活动许可**（以下简称核设施建造许可）。获得核设施建造许可的条件之一是满足核安全、辐射防护、物理保护和核材料安全保障的要求。此外，投资者必须确保有足够的资金来完成建设并维持核设施的安全（《原子能法》第38g条第1款）。该许可由原子能管理局局长在提交申请及所需文件之日起24个月内颁发。申请应包括初步安全报告、选址报告、核设施和核材料物理保护系统设计、环境条件决定、欧盟委员会根据《建立欧洲原子能共同体条约》第43条出具的意见，以及2021年8月30日部长理事会关于申请从事涉及电离辐射活动许可或申报从事此类活动所需文件的条例（Journal of Laws 2021.1667）中规定的其他文件。申请还应附上**水法许可和申报**，如果需要的话（2017年7月20日《水法》第388条第5款，公报2024.1087）。

PAA主席在收到核设施建设许可申请后，通过在公共信息公告上公布申请内容及简要安全报告，使公众能够参与该程序。所有相关方均可提出意见和建议，并参与行政听证会（《原子能法》第39d条）。

根据《原子能法》第39e条规定，在审议许可申请期间，原子能管理局局长有权对申请所涉活动计划实施区域进行检查。为此，可委托授权实验室和专家机构提供服务，并要求进行研究或鉴定，以核实是否符合核安全和辐射防护条件。

根据《原子能法》第39f条规定，在颁发许可前，原子能管理局局长应向核安全与辐射防护委员会提交申请，请求就许可草案发表意见。获得该意见后，草案将转交申请人，申请人有一个月时间提出意见。在审议这些意见后，原子能管理局局长将就核设施建设许可作出决定。该决定连同申请内容和简要安全报告将予以公布。

核设施建设许可证规定了许可范围内活动的实施条件，包括设计要求、组织单位在核设施安全、设备、员工、公众和环境（包括辐射防护）方面的义务、应急计划和程序、核设施管理以及运行限制和条件（《原子能法》第39g条）。

获得核设施建设许可是颁发建筑许可的必要条件。该许可可由投资者在建筑许可审批程序中提交申请。该许可的内容，连同确定投资地点的决定，对签发建筑许可的省长具有约束力（《特别法》第15条第2款）。

核设施建筑许可审批流程的最后阶段是提交**建筑许可**申请，同时附上建筑设计方案及所有必要的正式附件。整个材料将由主管行政机关进行合规性审查。审核流程的第一步是评估申请的完整性（形式审核），根据《建筑法》第33条第6款规定，主管部门有义务在收到申请后14天内完成此项审核。若申请存在形式缺陷，主管部门将要求申请人于指定期限内予以补正。若申请人无法在规定期限内补正，有权申请延长程序期限。在此情况下，行政机关可依据《行政程序法》第64条（公报2024.572）推迟程序。在申请人作出必要修正且行政机关认定申请符合要求后，该机关将通知相关方行政程序已启动。下一步是实质性审查，期间将分析申请书及附件的内容。在此阶段，建筑与规划部门亦有权要求申请人修正申请书中的错误，并设定修正期限。申请人可补充文件资料，就所采用的解决方案提供补充说明，或要求主管机关说明其要求的法律依据。在项目修正/说明后，主管机关可作出决定结案。

在获得建筑许可后，将签发施工日志，任命施工经理，准备施工文件，随后即可开始施工，从准备工作开始，继而进入正式的建筑施工阶段。

除主要决策描述在本章节外，在根据投资范围和复杂性，根据单独规定可能需要其他决策和协调（例如砍伐树木许可、当投资位于国道或省道旁时进入公共道路的许可等）。通常情况下，这些决定作为建筑许可申请的附件提交。

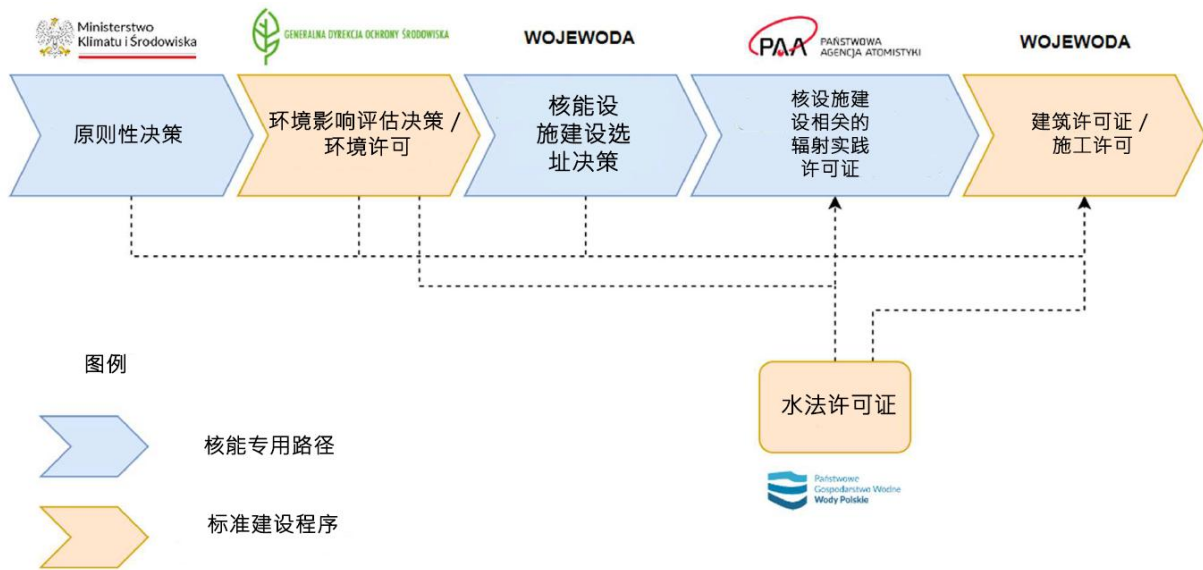


图46 简化流程图，展示核设施建筑许可的获取过程。

10.2. 核电投资过程中的法律与立法障碍

在波兰获得核电站建设许可是一个复杂的过程，面临着许多法律障碍。对《原子能法》、《建筑法》和《特别法》的分析表明存在以下障碍：

10.2.1. 分散且不精确的法规

核设施建设许可审批流程的相关法规分散于多部法律文件中，这使得法规的解读与执行变得困难。虽然《原子能法》和《特别法》在一定程度上简化了流程，但并未消除所有障碍。此外，现行法规中存在一些表述模糊、留有较大解释空间的条款。

10.2.2. 参与审批必要许可和许可的行政机关缺乏经验

在波兰获取核电站建设许可的一个重要障碍是行政机构缺乏经验。迄今为止，波兰尚未实施过此类投资项目，这导致负责项目评估的官员和机构缺乏处理此类项目特殊要求的实践经验。

核电站建设许可的审批流程极为复杂，需综合考量法律、技术、环境及建筑等多重因素。其中，严格遵守核安全与辐射防护法规，以及满足国家技术与建筑规范尤为关键。

缺乏此类投资评估的先例经验可能导致决策过程延长及法规解释不明确。此外，行政机构为规避潜在失误可能采取过度谨慎的态度，从而导致额外要求增加及项目实施延误。

10.2.3. 核电站建设项目评估的两条独立路径，以及核设施缺乏单独的豁免路径

在波兰法律体系中，核电站的建设需接受两个独立机构的评估：波兰原子能管理局局长和省长。问题在于这两个机构采用不同的评估标准。PAA主席侧重核安全和辐射防护，允许采用基于国外规范和标准的解决方案，前提是这些方案获得国际认证。这种体系在项目审批方面具有一定灵活性，特别是对于基于全球成熟解决方案且可适应波兰国情的“标准厂房”项目。而省长则必须严格遵守波兰的技术和建筑法规。

在实践中，这意味着“标准厂房”项目虽然基于公认的国外标准，但必须符合波兰建筑法的规定。特别法并未豁免遵守国家技术建筑法规的要求，这意味着“标准厂房”项目通常需要修改或获得豁免。在豁免方面，核设施没有单独的程序，因此原子能管理局局长不参与豁免批准流程。结果可能出现以下情况：项目符合核安全要求，但因不符合当地建筑要求而未获省长批准，或反之亦然。

10.2.4. 缺乏现有设施的改造路径

在实施核电站建设相关投资的过程中，一个重要的法律障碍是缺乏关于将现有设施、设备或基础设施改造以适应此类项目要求的法规。最初设计和用于其他目的的设施可能不符合核电站运行所需的技术和形式标准。

现行法规未规定专门的程序路径，允许将现有建筑物、设施或基础设施改造和适应，使其符合核能设施建设中辐射防护和核安全的要求。此外，也缺乏指导方针来规定此类改造所需提交的技术文件的范围和类型，以证明符合核安全要求。

10.2.5. 建议：

- 制定并实施详细的法律法规，使最初为其他用途设计的设施能够按照核电站的要求进行改造。
- 制定详细指南，规定改造后的设施必须满足哪些技术标准才能被纳入核电站基础设施使用。这些指南还应包括证明符合安全标准所需的技术文件的类型和范围。
- 引入一项程序，用于评估改造后的设施是否符合技术要求以及辐射防护和核安全要求。该过程可由监管机构（如国家原子能机构）负责实施。

11. 投资项目时间表

假设该项目于2026年启动，2045年结束，总计涵盖20年的密集投资、行政及技术活动。项目进度表被划分为若干重大阶段，其顺序与关联性对项目成功实施至关重要。

在第一年，即2026年，计划制定可行性研究，该研究将作为评估项目实施可能性及制定后续战略决策的基础。2027年初，投资者决定继续推进该项目后，将开始为期多年的行政审批阶段，包括环境评估和选址审批等。该阶段将持续至2032年。

2032年至2034年期间，将持续开展获取必要建筑许可的相关工作，其中2033年启动建筑设计方案编制，该工作将于次年完成。

于2032年颁发，而建筑许可计划于2034年底颁发，这标志着从正式阶段到实际施工阶段的分水岭。

2034年开始设计阶段，持续至2042年。与此同时，从2036年起将进行部件和设备的采购与交付。这两个过程将并行开展，从而缩短总工期。

自2033年起，施工现场也将展开密集的准备工作。反应堆主体工程将于2034年启动，持续至2042年。关键节点——反应堆建设启动——定于2035年。

2041年竣工后，所有系统的测试工作随即展开。与此同时，自2041年底起，启动许可的申请工作同步推进。启动过程本身持续两年。最后，从2044年中期到2045年初，将进行运营许可的申请流程，从而完成整个投资项目。

值得注意的是，现有燃煤机组计划于2032年逐步关闭。

整个时间表体现了核能项目特有的高度复杂的长期规划。它显示了漫长的准备期，包括近十年的分析和行政程序，实际建设才得以启动。时间表的关键风险包括：环境和选址决策可能出现延迟；设计和采购过程可能因市场变化而延长；以及测试和调试阶段的漫长周期，这反映了对安全性和施工精度的严格要求。

该时间表基于明确定义的多年期阶段，其中部分活动以可控方式相互重叠。这既能优化实施时间，也要求对设计、执行和正式流程进行精确协调。鉴于各阶段的持续时间和复杂性，风险管理、法律稳定性以及合格人员和技术供应商的可用性将至关重要。

该项目雄心勃勃，但其结构符合国际核能投资标准，既满足了形式要求，也考虑了技术、物流和社会方面的实际需求。

12. SWOT分析

表24 SWOT分析

	积极因素	消极因素
内部	<ul style="list-style-type: none"> • 提高能源安全 • 恢复发电能力（约1600兆瓦） • 利用当地人力资源和本地企业的可能性 • 降低电力生产源的排放强度（相较于燃煤机组） 	<p>劣势</p> <ul style="list-style-type: none"> • 难以利用分析对象现有技术基础设施 • 必须释放现有200级机组及其外部设施的全部用地 • 投资计划需配合燃煤机组的关闭时间进行调整 • 与其他技术相比，投资成本较高
外部	<p>机遇</p> <ul style="list-style-type: none"> • 按照煤炭转核电的理念，实现波兰能源脱碳计划 • 地方发展——电厂保留在现有地点。 • 保持/增加就业岗位减少对奥得河当地水环境的不利影响，这可能转化为与环保组织更好的合作 	<p>风险</p> <ul style="list-style-type: none"> • 在原燃煤电厂旧址上建造核反应堆 • 融资——融资安排困难 • 法规调整以适应煤炭转核电的方针 • 核能投资在同一时期集中爆发 • 运营层面无法获得足够资金支持的风险（差价合约）