

# 人工智能的物理成本

## 能源、水资源与算力基础设施的新兴监管

研究报告

2026 年 10 月 8 日 | 版本 1.2 | 简体中文译本

Guy Duport 为 Ascendancy Advisors Limited 编写

### 核心命题

人工智能越来越被描述为软件产业，但其实际建设方式正在呈现重工业特征。它的物理底座——电力、水资源、土地、输电、冷却、备用发电、半导体制造、电网设备、光纤网络以及日益增加的专用发电资产——已经成为公共政策、产业战略和国家安全的重要议题。

### 研究范围

美国 · 中国 · 欧盟与爱尔兰 · 澳大利亚 · 南非及更广泛的非洲 · 台湾 · 轨道算力

### 摘要

人工智能的快速扩张正在改变数字基础设施的经济与政治逻辑。数据中心已不再只是支撑互联网服务的后台设施。AI 训练与推理正在形成一类高密度、强集中度的电力负荷，其需求越来越直接地影响电力系统规划、水资源配置、产业政策、土地使用和社区接受度。国际能源署预计，全球数据中心用电量将从 2024 年的约 415–460 TWh 增至 2030 年的约 945 TWh，其中美国和中国占新增需求的大部分。全球占比本身会低估政策压力：数据中心需求高度集中，往往可以比新增发电和输电基础设施更快出现，并可能在局部地区与其他用途争夺稀缺容量。

本报告通过美国、中国、欧盟与爱尔兰、澳大利亚、南非及更广泛的非洲、台湾等案例，分析 AI 基础设施对物理资源的影响。报告区分数据中心现场的直接用水与发电环节产生的间接用水，反对将“每次查询耗水多少升”作为普遍指标，并提出三个相互关联的政策检验：新增性、基础设施主权和本地收益。报告认为，政府既不应出于本能阻止 AI 基础设施，也不应无条件补贴。超大规模算力应被视为战略性重型基础设施：大型项目应披露能源与水资源画像，承担其触发的增量基础设施成本，

在电网受限地区证明可信的新增发电或储能能力，保护居民和既有产业的基本供应，并留下可衡量的国内收益。

核心结论是，AI 治理的下一阶段不会只围绕模型行为、安全和责任展开，也将治理大规模生产智能所需的物理系统。在许多司法辖区，决定性问题将不再只是“是否需要 AI”，而是：谁获得稀缺的电力和水，谁支付配套基础设施，谁控制由此形成的算力，以及谁最终获取经济价值。[1]

## 执行要点

- AI 基础设施正在成为电力系统问题。挑战不只是全球电力占比，而是新增负荷出现的速度和地理集中度。
- 用水数据必须严谨区分：冷却直接耗水、取水量，以及发电环节产生的间接耗水并不是同一指标。
- 美国最清楚地显示出算力需求向发电上游延伸。Berkeley Lab 2026 年更新估计，到 2030 年数据中心可能占美国用电量的 11.8%，情景区间为 9.5%–15.3%。[2]
- 中国通过“东数西算”、国家枢纽节点、绿色电力目标和直接可再生能源供应，更系统地协调算力与能源地理。
- 欧洲正在从自愿可持续披露转向强制测量；爱尔兰进一步把新的电网接入与本地发电/储能以及 80% 的新增可再生电力挂钩。
- 澳大利亚成为“社会许可”的现实试验场。2026 年参议院调查以及悉尼 90 MW Project Mars 项目撤回说明：即便技术上可行，如果社区影响和基础设施负担分配不当，项目仍可能在政治上失败。[3]
- 南非最鲜明地体现分配问题。撒哈拉以南非洲仍有 5.6 亿多人缺乏电力接入；正确的政策不是拒绝数据中心，而是把新增性、可靠性、可负担性和本地收益作为明确条件。[4]
- 台湾提供了重要的能源安全案例：自 2025 年以来，5 MW 及以上的超大规模和托管数据中心需提交能源使用文件并采用最佳可行技术；2026 年的提案进一步加入产业收益审查。[5]
- 轨道算力已不再完全是设想。Google 的 Project Suncatcher 与 SpaceX 的轨道数据中心申请显示，太空更多是转移外部性，而非消除外部性。[6]
- 最有力的监管原则是“新增性”：在基础设施受限地区，大型新算力负荷应与真正新增的发电、储能、输电以及必要的水资源基础设施相配套。
- 基础设施主权应理解为：国家能够承载并控制具有战略意义的算力，而不降低基本公共服务、不把无补偿成本转嫁给居民，也不依赖无法有效治理的基础设施。
- 物理瓶颈不止是发电。变压器、开关设备、光纤、海底连接、半导体和建筑材料都可能成为约束，一些电网设备的采购周期以年计算。[29]
- 气候韧性与分配公平应成为明确的审批测试。极端高温、干旱和网络中断可能放大设施影响，而社区可能承担噪声、备用发电排放、输电走廊和用水负担，却没有获得相称的经济价值。
- 随着环保监管增强，“算力民族主义”也在出现。出口管制、半导体主权以及不同的水/碳规则可能改变 AI 的地理布局及其物理足迹，却未必降低全球资源需求。[32]

# 目录

1. 引言：AI 正在成为重工业
2. 方法与分析框架
3. 物理基础链：电力、水、土地与热
4. 政策比较概览
5. 美国：算力需求向发电上游延伸
6. 中国：把基础设施规划作为算力政策
7. 欧盟与爱尔兰
8. 澳大利亚：能源转型与社会许可
9. 南非及更广泛的非洲
10. 台湾：算力主权与能源安全
11. AI 物理成本的监管框架
12. 政策建议
13. 局限与后续研究
14. 结论

## 1. 引言：AI 正在成为重工业

人工智能通常通过模型、算法、应用和软件来描述，但这一描述越来越不完整。前沿 AI 依赖一个迅速扩张的物理系统：先进半导体、服务器机架、变电站、高压输电、冷却设备、水系统、备用发电机、电池、光纤线路、土地，以及越来越多的专用或合同电源。从政策角度看，AI 正在获得更接近铝冶炼、石化和其他资本密集型产业的特征，而不是传统意义上的软件公司。

软件与基础设施的扩张速度不同。模型可以快速复制，而输电线、核电增容、水库接入或新变电站不能。一个数据中心园区可能在数年内规划并建成，但大型电网加固、电站和水务工程往往需要更长时间。由此产生的时间错配形成治理问题：私人需求可以比公共基础设施更快出现。

国际能源署估计，2030 年数据中心用电量约为 945 TWh，略低于全球电力需求的 3%，2024—2030 年年均增长约 15%。这一全球平均值掩盖了集中度。地方电网面对的不是“全球 3%”，而是某个地点突然出现 100 MW、500 MW 甚至吉瓦级的负荷。[7]

因此，政策问题不是抽象地问 AI 数据中心是否使用“过多”电力或水，而应具体问：该负荷是否超出系统原有规划？发电、输电和水务基础设施能否吸收而不降低可靠性？谁为扩容付费？项目创造新供应，还是只是优先锁定既有容量？东道地区保留多少经济价值？社区是否拥有足够的信息和参与权？

本报告用“基础设施主权”组织这些问题。它并不等同于自给自足或国家所有制，而是指一个司法辖区对关键基础设施的分配、韧性和战略后果保持实际控制。

## 2. 方法与分析框架

本报告是一项比较政策分析，使用截至 2026 年 10 月 7 日公开可获得的政府、监管机构、国际组织、实验室和行业资料。优先采用国际能源署、美国能源部、Lawrence Berkeley National Laboratory、欧盟委员会、国家监管机构、议会调查以及中国、台湾和南非官方资料。企业和社会组织提交材料用于呈现有争议的政策立场，但其估算被明确视为利益相关方主张，而不是中立事实。

有三点方法论警示。第一，以 MW 表示的数据中心容量不等同于年度耗电量。第二，取水量必须与耗水量区分：取用后回流的水，与蒸发或从本地水循环中移除的水，其环境影响不同。第三，设施现场的直接用水与发电所包含的间接用水不能混为一谈。

本报告对各地区反复使用八项检验：(1)算力增长的规模与速度；(2)电力系统容量与可靠性；(3)直接和间接水资源暴露；(4)材料、电网设备与网络依赖；(5)气候和运营韧性；(6)监管透明度；(7)新增性与成本分配；(8)本地、分配性和战略收益。

### 3. 物理基础链：电力、水、土地与热

人工智能的物理基础链条



运营指标只能覆盖基础设施链条的一部分；约束可能向上游或下游转移。

图1. 人工智能的物理基础链：它是一个一体化工业系统，而不是“无重量”的软件服务。上游包括资源开采、半导体制造、电网设备和建筑材料；下游包括热量排放、水排放、硬件寿命终结和网络依赖。

电力是最直接的约束，因为算力是持续的、集中式的，并对供电质量高度敏感。现代 AI 设施不仅需要大量电力，还需要高度可靠的电力。国际能源署预计，到 2030 年美国和中国将贡献全球数据中心用电增长的近 80%；相较 2024 年，美国约增加 240 TWh，中国约增加 175 TWh。[8]

年度平均能量与峰值或可靠容量之间的差异至关重要。数据中心即使签订与年度耗电量相当的可再生能源购电协议，在风光出力不足时仍然依赖电网。因此，年度匹配并不等同于物理新增性、小时级匹配或系统可靠性。

瓶颈经常位于输电和电网设备，而不是发电本身。高压变压器、开关设备、断路器和电力电子设备不可能总按数据中心建设周期采购。美国能源部资料显示，一些配电变压器交付期从 2019 年的约 3–6 个月增加到 2023 年的 12–30 个月，大型电力变压器可能需要数年。[29] 即使“表后”燃气、微电网或专用核电方案，也可能仍需并网研究、区域输电运营商批准、保护协调以及孤岛运行和应急规则。

水资源已成为最具政治敏感性的环境议题之一。Berkeley Lab 2024 年评估估计，美国数据中心 2023 年直接耗水约 660 亿升；与其所用电力生产相关的间接水足迹更大，接近 8000 亿升。[9] 但水强度会随着冷却方式、气候、电源和地点显著变化。

因此，把“每次 AI 查询消耗 X 升水”作为普遍指标并不合适。2024 年一项模拟非洲数据中心用水效率的研究估计，在其假设下，GPT-4 生成十页报告最高可涉及约 60 升水，而 Llama-3-70B 执行类似任务约为 0.7 升。这个巨大差异本身说明结果取决于模型架构、地点和电力系统，而不是固定物理常数。[10]

水政策应关注地点特定的稀缺程度、抗旱能力、冷却设计、水源质量和机会成本。同时还要考虑水质与热排放：浓缩排污、盐水、化学处理以及高温排放都可能影响水生态。监管问题至少是三维的：取水、耗水，以及排水质量/温度。[30]

进入数据中心的电力几乎最终都会转化为热。冷却因此不是附属系统，而是算力系统的一部分。更高密度的 AI 机架正在推动液冷部署；余热利用在一些寒冷地区和城市供热系统中具有潜力，但取决于当地热需求和管网经济性。

气候变化会进一步收紧这些约束。更高的环境温度会降低冷却效率，而整个电力系统同时面临空调负荷上升；干旱会限制水冷，野火或洪水可能威胁输电和光纤。大型园区应进行极端高温、干旱和网络故障条件下的气候韧性压力测试。

物理基础链还延伸到数据中心围栏之外：半导体制造需要大量电力、超纯水、化学品和设备；园区需要混凝土、钢、铜和铝；数字网络依赖陆地光纤、登陆站和海底电缆。嵌入式排放和材料瓶颈可能在设施满负荷运行多年之前就已经形成。

## 4. 政策比较概览

| 地区       | 主要约束              | 当前政策方向                 | 新增性信号                | 水治理         | 战略问题                             |
|----------|-------------------|------------------------|----------------------|-------------|----------------------------------|
| 美国       | 电网容量；本地用水；成本分配    | 州/地方管控 + 联邦能源响应        | PPA、核电增容和专用电源        | 碎片化         | 电网投资能否跟上且不把成本转嫁给居民？              |
| 中国       | 区域不平衡；东西部时延；本地缺水  | 国家枢纽布局和算力—电力协调         | 强调绿电与西部资源区           | 地区差异明显      | 国家协调能否把算力需求与能源和水资源地理相匹配？         |
| 欧盟 / 爱尔兰 | 透明度；受限电网          | 欧盟强制报告；爱尔兰接入条件         | 本地发电/储能 + 80%新增可再生能源 | 欧盟数据库含水足迹指标 | 强制测量能否转化为可执行的资源政策？               |
| 澳大利亚     | 电网转型；水；社会许可       | 参议院审查；国家标准形成中          | 新增可再生能源与可靠容量成为核心争论   | 透明度缺口较大     | 增长能否与能源转型和社区同意并存？                |
| 南非 / 非洲  | 接入、可靠性、可负担性、干旱    | 人权与监管审查开始加强            | 尚未系统化                | 披露不足，本地敏感度高 | 在基本可靠性尚未解决前，稀缺基础设施是否应优先服务超大规模负荷？ |
| 台湾       | 能源安全；半导体与 AI 负荷增长 | ≥5 MW 项目进行能源审查和 BAT 要求 | 规划阶段审查，而非默认接入        | 现行框架中次于电力   | 如何在受限的岛屿电力系统中平衡算力主权？             |

## 5. 美国：算力需求向发电上游延伸

美国是最重要的近期测试，因为 AI 投资正在撞上一个过去二十年负荷增长相对缓慢的电力系统。Berkeley Lab 2026 年更新估计，到 2030 年数据中心可能占美国总用电量的 11.8%，情景范围为 9.5%–15.3%。这比此前对 2028 年的预测更高，反映了计划中 AI 部署的速度。[11] 美国能源信息署 2026 年 10 月展望同样描述了创纪录的电力需求，数据中心开发和制造业共同推动商业和工业负荷增长。[12]

市场反应越来越像工业用户自行配置能源：科技公司签署长期购电协议、支持新增可再生能源、部署电池、探索燃气发电，并推动核电重启、先进反应堆和增容。2026 年 10 月 6 日，Google 与 Constellation 宣布一项 20 年安排，计划通过 PJM 地区 11 座在运反应堆的增容增加 890 MW 核电容量；Google 称，其通过重启和增容所促成的新核电能力已超过 1.5 GW。[13]

美国的治理问题仍然高度碎片化。选址、水资源、电价、税收激励分别由地方、州和联邦不同机构管理，因此一个项目的经济发展优惠、公共事业电网加固成本和市政水务义务可能彼此分离。当地居民如果认为电价上涨、缺水风险或税收优惠被社会化承担，反对就会成为实质性的项目风险。

快速负荷增长还带来近期化石燃料锁定风险。如果新的可靠低碳电源和输电无法及时上线，公用事业和开发商可能延长或新增燃气机组。专用电源可以改善可靠性和成本归因，但“表后”发电并不自动意味着清洁。项目审批应区分“新增可靠容量”和“新增低碳容量”。

小型模块化反应堆和先进反应堆常被视为高密度 AI 负荷的长期答案。它们最终可能提供靠近大型负荷的可靠低碳电力，但政策不能把它们当作即时解决方案。2026 年美国联邦项目仍把大规模 Gen III+ SMR 部署放在 2030 年代，许可、供应链、选址和首台套执行风险仍然显著。AI 园区通常可以比新核电站更快建成。[31]

正确的监管回应不是全国性暂停，而是成本归因。凡是项目触发可识别的发电、输电、配电或水系统投资，原则上应由项目承担增量成本，除非公共机构能够证明更广泛的系统收益足以合理化社会化分摊。

物理基础设施也正成为战略技术竞争的一部分。美国出口管制限制中国获得先进半导体制造设备、高带宽存储器和前沿 AI 能力。其基础设施后果并非线性：硬件受限可能提高软件优化、国产芯片以及更多较低等级设备的相对重要性。更广泛的含义是，算力技术管制可以在司法辖区之间转移能源、材料和资本需求，算力政策与能源政策越来越难以分开。[32]

美国全国用水数据适合观察规模，却不足以判断本地冲击。Berkeley Lab 估计，2023 年数据中心直接耗水约 660 亿升，其中超大规模和托管设施占 84%；在其情景下，仅超大规模设施到 2028 年的直接耗水可能达到 600 亿–1240 亿升。与此同时，风冷虽然可降低现场用水，却可能增加用电，从而把部分水足迹转移到发电端。[14]

资源约束还推动行业考虑更极端的替代方案：把部分算力搬到太空。Google 的 Project Suncatcher 是探索低地球轨道太阳能机器学习基础设施的长期研究计划，并于 2026 年 10 月 1 日发射首颗原型卫星测试 TPU 在辐射、热环境和航天条件下的表现。[15] SpaceX 则在 2026 年 2 月向 FCC 提交了最多 100 万颗卫星的非地球同步“Orbital Data Center”系统申请。[16] 这并不意味着系统已经可行；轨道算力仍需解决辐射、真空中的热排散、发射成本、故障替换、时延、碰撞规避和碎片问题。

## 6. 中国：把基础设施规划作为算力政策

中国与碎片化、逐项目发展的模式形成最强对比。“东数西算”战略试图把更多算力布局到土地和能源资源更充裕的西部，同时服务需求集中的东部。国家政策明确协调算力、数据、算法、电力和网络基础设施，并引导大型新数据中心进入国家枢纽节点。[17]

这种协调并不能消除上游约束。中国仍受先进半导体制造设备和高端 AI 加速器限制影响，尽管国内供应商正在改进。如果硬件效率长期存在差距，为实现相同计算量可能需要更多物理资源；但这一影响既非自动也非单向，模型优化、系统架构、工作负载设计和国内创新都可以部分抵消。政策意义在于，半导体主权与能源效率已经彼此交织。

这一模式的重要性在于，它把算力地理视为国家基础设施问题，而非单纯的房地产决策。它并非没有摩擦：对时延敏感的工作负载不可能全部远距离迁移；西部地区也有自身水资源约束；输电、光纤和可再生能源整合仍是工程问题。其战略优势仍然清晰：算力需求与电力系统被同步规划，而不是彼此独立到来。

绿色电力维度也更加具体。国家数据局表示，国家枢纽节点数据中心集群平均 PUE 约 1.3，领先设施可低至 1.04，并提出国家枢纽新建数据中心绿电比例超过 80% 的目标。2026 年，国家发展改革委还介绍了宁夏中卫云基地 500 MW 光伏项目，通过直接与虚拟绿电安排供电；项目全面运行后预计每年发电 4.3 TWh，其中 2.29 TWh 清洁电力供应云基地，足以覆盖其所述核心算力机房。[18]

因此，中国案例支持更广泛的“新增性”逻辑。政策问题不是只问数据中心能否买到足够电力，而是问算力应放在哪里、如何与可再生能源资源互动，以及输电和调度能否支撑。其他国家不需要复制中国的治理模式，也可以学习这种基础设施逻辑。

水资源仍然是更困难的比较变量。中国北方和西北地区可以拥有丰富的太阳能和风能，同时面临水资源稀缺。最适合电力供给的地点不一定最适合蒸发冷却。下一阶段需要更紧密地整合电力、气候和水资源，包括更广泛采用液冷、干式冷却、再生水，以及在时延允许时进行工作负载转移。

## 7. 欧盟与爱尔兰：从披露到有条件接入

欧盟迈出了最清晰的强制透明化步骤。根据修订后的《能源效率指令》和授权条例(EU) 2024/1364，符合条件的数据中心运营商必须向欧洲数据库报告能源性能指标，其中包括与水足迹相关的信息。欧盟委员会还表示正在制定最低性能标准，并于 2026 年启动相关研究。[19]

欧洲还提供了把物理成本监管延伸到硬件生命周期的早期模式。欧盟服务器和数据存储产品生态设计规则涵盖拆解、再利用、回收、关键原材料、安全数据删除和固件可用性。欧盟委员会同时推进数据中心可持续评级和最低性能标准。这意味着未来审批与采购可能不仅看运营 PUE 和 WUE，也会考虑可维修性、再使用和报废管理。[33]

更严格的欧洲制度同时暴露出“监管泄漏”风险。如果一个司法辖区对水资源稀缺、碳强度和电网加固成本进行计价，而另一个地方连这些数据都不披露，边际工作负载可能迁移，却不会减少全球资源使用。完全国际统一并不现实，但最低共同披露标准能够让迁移变得可见，也减少向下竞争的激励。

爱尔兰代表下一阶段：对受限基础设施实行有条件接入。数据中心用电占全国需求的比例从 2015 年的 5% 升至 2024 年的 22%。2025 年 12 月，Commission for Regulation of Utilities 通过新的接入政策，要求新数据中心在场址或附近配置足以匹配其最大进口需求的发电和/或储能能力，同时要求至少 80% 的年度电力需求由爱尔兰共和国境内新增可再生能源项目满足，并设置六年过渡期。[20]

爱尔兰的重要性在于它超越了单纯报告。监管者实际上在说：大型新负荷对系统承担的义务不止是支付标准电价。该政策对“新增性”的定义也更严肃——已受支持或已经签约的可再生能源项目不能简单重新贴标签来满足要求。这个模式不可能机械复制到所有市场，但对受限系统具有很强参考价值。

## 8. 澳大利亚：能源转型遇上社会许可

澳大利亚的讨论很有价值，因为它在行业仍快速扩张时公开展开。2026 年 5 月，参议院环境与通信参考委员会启动了关于人工智能与数据中心的调查，范围包括现行监管是否充分，以及对社区、产业、环境、水和能源的影响。9 月和 10 月 1 日举行了公开听证，委员会计划在 11 月提交报告。[21]

澳大利亚也体现了超大规模增长与电力部门脱碳之间的时间冲突。如果输电、储能和新可靠电源落后，大型新负荷会加强继续保留传统热电机组的商业理由。数据中心并不是化石燃料锁定的唯一原因，但其边际需求会影响退役计划和容量市场设计。

各方提交材料呈现明显政策分歧。行业强调投资、数字主权以及利用数据中心作为新电力基础设施锚定客户的机会；环保和民间组织强调负荷增长速度、用水透明度不足，以及数据中心可能延迟煤电退出或提高网络成本的风险。Climate Council 主张新增可再生能源和可靠化资源、最佳能源/用水标准、需求灵活性、成本回收与更高透明度。这些是倡导性建议，而不是已确定政府政策，但说明“新增性”已经从技术概念迅速转化为政治要求。[22]

最引人注目的发展是社会许可。Goodman Group 在 9 月底撤回悉尼 Lane Cove 拟建的 12 亿澳元、90 MW Project Mars 数据中心，项目距离住宅约 20 米，并在参议院调查期间承认尚未获得社会许可。[23]

经验并不限于澳大利亚。数据中心不能再假设“数字基础设施”的标签可以让它们免于电站、矿山、仓库或工业设施面临的政治问题。噪声、柴油备用、输电工程、视觉影响、土地使用、水和电价都是当地居民直接体验到的影响。

澳大利亚也说明，按照年度平均值规划具有风险。一个同时淘汰老旧煤电、增加波动性可再生能源、推动交通和工业电气化并吸收大型数据中心负荷的电力系统，必须同步规划可靠容量、输电和系统服务。即使数据中心签订足够的年度可再生能源合同，如果没有储能、可调度电源或灵活需求，仍可能加剧峰值约束。

## 9. 南非及更广泛的非洲：资源分配困境

非洲案例最能体现伦理和经济之间的权衡。最新 SDG 7 评估指出，撒哈拉以南非洲仍有超过 5.6 亿人没有电力接入，要实现普遍供电必须显著加快电气化速度。即便家庭已经接入电网，可负担性和可靠性仍是独立问题。[24]

然而，认为非洲国家必须等到普遍供电后才能接受数据中心投资同样是错误的。这会把非洲排除在战略产业之外，也忽视大型锚定负荷可能为发电、光纤、输电和技能提供融资的可能性。更有力的主张是“排序与配套”：系统受限时，超大规模项目应证明自己扩大了基础设施，而不是只重新分配稀缺容量。

南非已经直接面对这一问题。2026 年 5 月，South African Human Rights Commission 就数据中心快速扩张的人权影响征求公众意见，明确提出电力需求、电价、用水、气候影响、土地、透明度和公平接入。8 月，五个民间组织联合提交报告，称南非已有 60 多个已知设施、约 500 MW 已披露容量，同时缺少完整公共登记和强制行业用水/用电披露；它们要求公开调查、强制披露、社区收益义务，并考虑暂缓部分超大规模审批。这些属于利益相关方的主张和建议，不是官方结论，但 SAHRC 程序意味着治理问题已经从舆论层面进入制度层面。[25][26]

水资源让分配问题更加尖锐。南非长期面临市政供水短缺和气候相关干旱风险。2026 年 4 月，SAHRC 另外启动了对 Gauteng 持续缺水的调查，指出基础设施失效和反复服务中断。一个数据中心即使技术上高效，如果能够获得稳定水电，而邻近社区频繁中断，仍可能在政治上难以接受。[27]

正确的政策测试不是“人口优先、数据中心以后”，而是项目是否增加容量并保护基本供应。在受限的非洲市场，大型项目在开工前应回答四个问题：新增了什么发电或可靠化容量？资助了什么电网或配电加固？使用何种水源并如何应对干旱？项目投运后留下什么可衡量的国内收益——税收、技能、本地算力访问、研究能力或基础设施？

分配问题也超越家庭接入。社区可能承担变电站、输电走廊、柴油备用排放、噪声、取水和土地影响，而税收、所有权和数字价值在别处累积。因此，环境正义应该进入基础设施资产负债表。要比较的不是简单的“就业对 MW”，而是长期本地收益与整个配套系统的累计本地负担。

这正是基础设施主权变得具体的地方。如果东道国提供稀缺的电力、水、土地和税收优惠，而所有权、高价值服务和利润都留在境外，这种交易更接近资源型基础设施模式。反之，如果项目融资新的电力和水务系统，提高周边用户可靠性，增强本地云和研究能力，并支付完整网络成本，它就可能成为发展型基础设施。

## 10. 台湾：算力主权与能源安全相遇

台湾是一个重要案例，因为它处在全球 AI 硬件供应链核心，同时运行一个外部互联选择有限的岛屿电力系统。半导体制造和 AI 数据中心的增长因此直接与能源安全相交。台湾无法把算力当作战略上可有可无的能力，但也不能假定每个大型负荷都天然拥有接入电网的优先权。

2025 年底，经济主管部门修改相关能源规定，要求合同用电容量至少 5 MW 的超大规模和托管数据中心在规划阶段提交能源使用手册并采用最佳可行技术。2026 年 7 月，又提出在评估中加入产业收益审查，使项目不仅接受能效和供电可行性检查，也评估其对本地供应链和产业的贡献。[28]

这是一项重要监管演变。审批问题从“能不能给设施供电？”转向“这是对稀缺电力容量的最佳使用吗，它带来什么战略收益？”台湾由此为其他受限地区提供了可操作的算力主权审查模式。

集中度还会产生韧性问题。当少数超大园区既是重要电网负荷，又嵌入云、半导体和关键服务生态时，其电力和网络系统会成为国家基础设施风险的一部分。网络攻击、冷却故障或负荷突然丢失并不一定会在所有情况下导致电网失稳，但监管机构应对这些情景建模，而不是假设影响会止于设施围栏。

工业收益测试也必须谨慎。政府并不擅长预测哪些单个私人投资会创造最大长期价值，因此相关标准应公开、可测量，并且只与真正稀缺的基础设施挂钩。

## 11. AI 物理成本的监管框架

各地区制度不同，但监管问题正在趋同。最有效的框架并不是给所有数据中心设定一个全球统一的能源或用水上限，而是随着本地基础设施越受限，逐步提高项目应满足的条件。

### 11.1 基础设施主权测试

| 测试项   | 核心问题                                     |
|-------|------------------------------------------|
| 系统充分性 | 电力、水和通信系统能否在峰值、干旱和应急条件下服务项目，而不降低基本公共服务？  |
| 新增性   | 项目是否真正促成新的发电、储能、输电、再生水或其他基础设施，还是只签约已有容量？ |
| 成本归因  | 项目引发的网络、发电、水和韧性成本，是否由项目及其客户              |

|         |                                                            |
|---------|------------------------------------------------------------|
|         | 承担，而不是自动社会化？                                               |
| 气候与资源韧性 | 设施及其配套系统能否承受极端高温、干旱、洪水、野火、供应链中断和合理的网络故障？                   |
| 透明度     | 用电、用水、冷却、备用发电、排放和停机指标是否以可比形式披露，同时保留合理的安全保护？                |
| 本地收益    | 东道地区是否通过就业、税收、技能、研究能力、本地算力访问、基础设施或供应链获得可衡量且持久的价值？          |
| 分配公平    | 本地承担的用水、噪声、备用排放、土地、变电站和输电走廊负担，是否与长期本地价值相称？如负担显著，是否存在可执行补偿？ |
| 韧性与战略主权 | 项目在能源、网络、气候、地缘政治或供应链中断时，是增强还是削弱国家维持关键数字和物理服务的能力？           |

### 11.2 新增性应成为核心原则

新增性最有价值之处，在于区分“生产性投资”与“资源占用”。一个促成新太阳能电站、核电增容、电池、输电线路或再生水系统建设的项目，与一个只签约已经服务居民和既有工业容量的项目，在经济上并不相同。

新增性不能简化为购买可再生能源证书。真正重要的是物理系统能力。在受限电网中，监管者应问项目是否在需要的地点和时段增加可靠 MW；在缺水地区，则应问是否增加抗旱的非饮用水供应、再生水或其他韧性能力。这也是 24/7 Carbon-Free Energy (CFE) 与小时级匹配的逻辑：声明应依据电力何时、何地实际供应来检验，而不仅是年度证书平衡。

要求还必须保持比例原则。小型企业数据中心不应承担与 500 MW 超大规模园区相同的义务；阈值可以结合合同进口容量、预计年度消耗和本地系统压力设定。

### 11.3 接入、可靠性与可负担性必须分开衡量

基础设施政策常把“接通”当作目标，但 AI 时代应分别衡量接入、可靠性和可负担性。一个接入但频繁停电的家庭，与一个拥有冗余变电站、合同可靠性以及柴油或电池备用的超大规模设施，并没有获得同等经济服务。监管者因此应测试新算力需求是否提高其他用户的停电风险、电价压力或燃料依赖。

这一点在新兴市场尤为重要，但并非其独有。爱尔兰的电网约束、澳大利亚转型以及美国输电排队都表明，发达经济体也面临稀缺，只是程度不同。

### 11.4 相互依赖与网络—物理韧性

电力、算力、通信与公共基础设施正在形成相互依赖。电力系统为 AI 和云服务供能；这些服务又越来越多地支撑电网预测、物流、水管理和关键运营；光纤连接控制层。长期停电会使算力失效，而重大算力或通信中断也可能削弱用于管理物理基础设施的系统。监管因此应评估循环依赖、恢复时间和故障模式，而不是把每项资产孤立审查。

## 11.5 算力民族主义、监管泄漏与国际基线

AI 的物理成本也越来越具有地缘政治属性。国家可以通过先进芯片、半导体设备、能源技术、电网设备和战略基础设施准入影响竞争对手；企业也可能利用不同环境与披露规则，把工作负载或新园区转移到监管更宽松的地区。全球统一许可制度既不现实也未必可取，但最低国际报告基线能够提升可比性，并让碳、水和基础设施“泄漏”变得可见。

## 12. 政策建议

### 12.1 透明度与报告

- 要求大型数据中心按设施披露：合同与实际电力需求、年度用电量、直接取水与耗水、水源、冷却技术、相关排放特征、备用发电、排放以及重大停机。合理的安全信息可以受到保护，但不能以此接受商业不透明。
- 实施双重水核算：分别计算现场直接取水/耗水以及发电环节的间接用水；如存在工艺或冷却排水，还应评估温度和水质，而不是只看体积。
- 定期建立国家算力基础设施资产负债表，跟踪运营和规划 MW、年度用电、用水、发电新增、网络投资、本地所有权、云集中度和主要战略依赖。
- 推动最低国际披露基线。即使实质性环境标准仍由国家或地方决定，可比报告也应让碳、水和基础设施转移变得可见。

### 12.2 电网完整性、新增性与灵活性

- 在受限系统中实施新增性要求。大型新负荷应提供与其规模相称、可信的新发电、储能、输电、需求灵活性或水基础设施方案。
- 采用成本归因规则。项目触发可识别的电网、发电或水系统升级时，除非独立监管机构认定其他用户获得相称收益，否则开发商和锚定客户应承担增量成本。
- 奖励时间、空间和计算层面的灵活性。非紧急训练和批处理任务可在条件允许时跨时段、跨区域转移，或降低计算强度，以减少峰值需求、可再生能源弃电和水压力。动态电价、可中断负荷合同、需求响应支付和预先约定的削减安排可以让灵活性产生真实经济价值。[34]
- 对大型集群进行累计基础设施评估。多个设施如果依赖同一变电站、变压器供应链、含水层、水库、光纤线路或市政系统，单个项目审批并不足够。对于触发长期公共基础设施的大型项目，还应考虑退役保证金、最低使用承诺或适当的资产搁浅赔偿机制，避免项目取消、缩减或算力经济性变化后由费率用户承担未回收成本。

### 12.3 规划、韧性与社区权利

- 用气候与资源韧性测试取代平均情景选址，覆盖极端高温、干旱、洪水、野火、冷却性能下降、备用燃料可用性以及合理的电网/光纤故障。

- 从项目早期就把社区同意和环境正义视为项目风险变量；在设计方案锁定之前披露噪声、用水、备用发电排放、变电站、输电走廊、土地使用和累计影响。
- 把公共激励与公共价值挂钩。税收优惠、加速审批和公共基础设施支持应以可衡量结果为条件，例如新增电力容量、本地研究访问、技能培养、余热利用、再生水或社区投资。
- 要求大型运营商维持可验证的硬件生命周期计划，包括服务器和冷却设备的安全再利用、翻新、回收责任和材料循环。欧盟生态设计规则已经说明，循环性可以纳入服务器政策。[33]

## 12.4 产业与地缘政治战略

- 把算力基础设施纳入国家安全和产业政策。政府应掌握战略算力在哪里、由谁所有、依赖什么电力和网络系统，以及在电网、网络、气候或地缘政治中断后能多快恢复。
- 在分配稀缺公共基础设施或重大激励之前应用“基础设施主权测试”。超大规模项目应增强东道系统，而不是只消耗它。
- 不要用单一全球效率指标监管。PUE 和 WUE 是有用的运营指标，但绝对资源使用、稀缺性调整后的影响、嵌入式基础设施和系统韧性同样重要。
- 把专用核电和其他可靠电源视为战略选项，而不是时间表假设。SMR 和先进反应堆未来可能对算力重要，但首台套许可和部署周期仍明显长于、也更不确定于许多数据中心建设周期。[31]

## 13. 局限与后续研究

最大的局限是数据质量。公开报告经常混合规划、合同和已经运营的 MW；用水披露标准化程度低于用电披露，间接用水估算又高度依赖电力结构假设。因此，跨国比较应理解为政策比较，而不是精确的环境绩效排名。

AI 效率变化很快。芯片、模型架构、量化、调度和冷却可以降低单位计算能耗，但成本下降又可能通过反弹效应增加总需求。因此，2030 年预测应视为情景，而非确定性结果。

数据中心的经济收益也难以比较。建设期就业可以很大，而长期现场就业相对有限；但云服务可用性、较低时延、研究访问和数字主权又会产生直接就业无法捕捉的价值。未来研究应建立衡量每 MW 战略算力在国内留下多少价值的共同框架。

本报告并未完成 AI 硬件全生命周期评估。半导体制造、采矿、设备制造、建筑材料和电子废物都会增加运营边界之外的水、能源、碳和材料影响。本报告仅在第 3 节将这些供应链效应纳入更广泛的物理基础链。

财务和资产搁浅风险也需要进一步研究。发电、变电站和水系统是长寿命投资，而模型效率、工作负载位置和 AI 需求可能迅速变化。过度建设因此完全可能发生。贷款人、保险机构和监管者将需要把利用率、水可用性、气候暴露和技术淘汰放在同一框架下评估。[35]

未来还可以研究是否能在不同司法辖区之间标准化一个多维“物理成本仪表盘”。单一综合分数会产生任意权重并造成虚假精确；更好的起点是针对明确服务单位或设施容量，统一报告电力、可靠容量、水、土地、嵌入式碳、硬件生命周期和韧性指标。

轨道算力同样仍是研究前沿，而不是近期替代地面超大规模训练的现实方案。其治理跨越频谱、发射许可、碎片缓解以及现有空间法中的国家责任；任何环境比较都必须计入发射排放、替换周期、轨道拥堵和寿命终结处置，而不能只看到地面水和土地节约。[36]

## 14. 结论

人工智能正在成为 2020 年代最重要的基础设施需求之一。真正的政策选择并不是“发展 AI”与“保护电力和水资源”二选一。更准确的任務，是设计一套制度，让战略算力能够增长，同时把其物理成本纳入投资决策，而不是外部化给居民、既有产业或未来公共预算。

比较证据已经显示出趋同：欧盟强制披露；爱尔兰对电网接入附加条件；中国把算力地理与能源地理协调起来；台湾在规划阶段审查大型项目；澳大利亚通过议会调查和社区反对测试社会许可；南非开始把数据中心扩张作为人权与基础设施问题；美国科技公司则越来越多地直接为支撑自身增长的发电资产提供资金。

这些路径在政治上差异很大，但共享一个正在形成的认识：算力不是“无重量”的。它有地点、有电源、有冷却系统、有水足迹、有电网连接、有硬件供应链、有通信骨干，也存在机会成本。随着这些依赖加深，AI 基础设施也会成为国家韧性和地缘政治竞争的一部分。

因此，最有力的政策原则很简单：基础设施充裕的地方，应支持增长；基础设施受限的地方，超大规模算力必须带来新增基础设施、透明的资源核算和可信的本地价值方案。战略 AI 能力应增强东道系统，而不是只消耗它。

下一阶段的 AI 治理因此将远远超出算法本身。它会治理变电站、水库、反应堆、输电走廊、冷却系统、产业激励，甚至可能治理轨道基础设施。人工智能的输出仍然是数字化的，但其战略竞争正变得越来越物理化。

## 参考文献

International Energy Agency (IEA), Energy and AI (2025), especially sections on energy demand and energy supply for AI.

Lawrence Berkeley National Laboratory, 2024 United States Data Center Energy Usage Report (December 2024).

Lawrence Berkeley National Laboratory, United States Data Center Energy Usage Report: 2025 Update (June 2026).

European Commission, Energy performance of data centres; Energy Efficiency Directive reporting framework and Delegated Regulation (EU) 2024/1364.

Commission for Regulation of Utilities (Ireland), Decision on New Electricity Connection Policy for Data Centres (12 December 2025).

National Development and Reform Commission (China), materials on 'East Data, West Computing' and green compute-power coordination, including July 2026 update.

National Data Administration (China), green electricity and data-centre efficiency policy materials.

Australian Senate Environment and Communications References Committee, Inquiry into Artificial Intelligence and Data Centres (2026).

Climate Council of Australia, Submission to Senate Inquiry into AI and Data Centres (June 2026).

South African Human Rights Commission, Call for Public Submissions on Data Centres and Human Rights in South Africa (22 May 2026).

Open Secrets et al., Joint submission to the South African Human Rights Commission on data centres (August 2026).

International Energy Agency and partner organisations, Tracking SDG 7 / electricity access data (2026).

Ministry of Economic Affairs, Taiwan, Energy Administration materials on data-centre energy-utilisation review (2025–2026).

Google, Project Suncatcher research updates (2025–2026).

US Federal Communications Commission, Public Notice DA 26-113, SpaceX Orbital Data Centers application (4 February 2026).

Shumba, N. et al., 'A Water Efficiency Dataset for African Data Centers', arXiv:2412.03716 (2024).

US Energy Information Administration, Short-Term Energy Outlook, October 2026.

Google / Constellation Energy, 890 MW nuclear uprate announcement, 6 October 2026.

US Department of Energy, Office of Electricity, Supply Chain and Market Analysis; Large Power Transformer Resilience Report; 2026 grid-hardware materials.

US Environmental Protection Agency, Cooling Water Intakes; Thermal Discharges in NPDES Permits; Water Reuse Case Study: Quincy, Washington.

US Department of Energy / Nuclear Regulatory Commission, 2026 advanced-reactor and SMR deployment and licensing materials.

US Department of Commerce, Bureau of Industry and Security, advanced semiconductor export-control materials.

European Commission, Ecodesign Regulation (EU) 2019/424 and data-centre sustainability / circular-economy policy materials.

International Energy Agency, Electricity 2026, chapter on flexibility and demand response.

S&P Global, data-centre insurance and infrastructure-risk materials (2026).

UNOOSA / NASA / FCC materials on space debris, spectrum and orbital infrastructure governance.

## 出版说明

本报告是 Ascendancy Advisors Limited 独立编写的战略政策评估，不构成法律、工程、投资或环境建议。所有定量预测均取决于情景假设，不应被视为未来消费、容量或环境影响的保证。引用利益相关方提交材料时，报告明确区分其主张与监管机构或公共主管部门的正式结论。

## 来源注释

1. International Energy Agency, Energy and AI (2025), energy-demand and energy-supply chapters. <https://www.iea.org/reports/energy-and-ai/>
2. Lawrence Berkeley National Laboratory, United States Data Center Energy Usage Report: 2025 Update (June 2026). <https://datacenters.lbl.gov/publications/united-states-data-center-energy-2025>
3. Australian Senate Environment and Communications References Committee, Artificial intelligence and data centres inquiry (2026); Reuters, 28 September 2026, on the withdrawal of Goodman Project Mars.

4. International Energy Agency et al., Tracking SDG 7 update, 24 June 2026.
5. Taiwan Ministry of Economic Affairs, Energy Administration, data-centre measures, 16 December 2025 and 1 July 2026.
6. Google, Project Suncatcher update, 1 October 2026; US Federal Communications Commission Public Notice DA 26-113, 4 February 2026.
7. International Energy Agency, Energy and AI (2025), “Energy demand from AI” .
8. International Energy Agency, Energy and AI (2025), regional outlook.
9. Lawrence Berkeley National Laboratory, 2024 United States Data Center Energy Usage Report, pp. 56–58.
10. Noah Shumba et al., “A Water Efficiency Dataset for African Data Centers” , arXiv:2412.03716 (2024).
11. Lawrence Berkeley National Laboratory, United States Data Center Energy Usage Report: 2025 Update (June 2026).
12. US Energy Information Administration, Short-Term Energy Outlook, 6 October 2026.
13. Google and Constellation Energy, 890 MW nuclear-uprate announcements, 6 October 2026.
14. Lawrence Berkeley National Laboratory, 2024 United States Data Center Energy Usage Report, Figure 5.9 and pp. 56–58.
15. Google, “Our Project Suncatcher prototype satellite is in orbit” , 1 October 2026.
16. US Federal Communications Commission, DA 26-113, 4 February 2026.
17. National Development and Reform Commission and National Data Administration, national integrated computing network / “East Data, West Computing” policy materials (2024).
18. National Development and Reform Commission, green-compute update, 27 July 2026; National Data Administration, 18 March 2025.
19. European Commission, “Energy performance of data centres” ; Delegated Regulation (EU) 2024/1364.
20. Commission for Regulation of Utilities (Ireland), new electricity connection policy for data centres, 12 December 2025.

21. Australian Senate Environment and Communications References Committee, Artificial intelligence and data centres inquiry (2026).
22. Climate Council, Submission to Senate Inquiry into AI and Data Centres, 9 June 2026.
23. Reuters, “Australian developer axes Sydney suburban data centre plan after local opposition” , 28 September 2026.
24. International Energy Agency et al., Tracking SDG 7 update, 24 June 2026; IEA, Financing Electricity Access in Africa (2025).
25. South African Human Rights Commission, call for submissions on data centres and human rights, 22 May 2026.
26. Open Secrets et al., joint SAHRC submission / press release, August 2026. Figures cited are stakeholder estimates.
27. South African Human Rights Commission, Gauteng water-crisis inquiry, 13 April 2026.
28. Taiwan Ministry of Economic Affairs, Energy Administration, data-centre energy review measures, 2025–2026.
29. US Department of Energy, Office of Electricity, “Supply Chain and Market Analysis” (2026) and Large Power Transformer Resilience Report (2024); DOE 2026 materials report distribution-transformer lead times of 12–30 months in the latest underlying data and large-transformer lead times that can extend to several years. <https://www.energy.gov/oe/supply-chain-and-market-analysis>
30. US Environmental Protection Agency, “Cooling Water Intakes” and “Thermal Discharges in NPDES Permits” ; EPA, Water Reuse Case Study: Quincy, Washington. <https://www.epa.gov/cooling-water-intakes> ; <https://www.epa.gov/waterreuse/water-reuse-case-study-quincy-washington>
31. US Department of Energy, “Energy Department Awards \$94 Million… Small Modular Reactors,” 14 May 2026; US Nuclear Regulatory Commission, 2026 advanced-reactor licensing materials. DOE describes supported Gen III+ SMR deployments as contributing to new nuclear generation in the 2030s. <https://www.energy.gov/articles/energy-department-awards-94-million-american-companies-help-expedite-deployments-small>
32. US Department of Commerce, Bureau of Industry and Security, 2 December 2024 advanced-semiconductor export-control package and related controls on AI/advanced-computing

technology. <https://www.bis.gov/press-release/commerce-strengthens-export-controls-restrict-chinas-capability-produce-advanced-semiconductors-military>

33. European Commission, “Servers and Data Storage Products” (Ecodesign Regulation (EU) 2019/424) and “Energy performance of data centres.” Circular-economy provisions include component extraction, critical-material information, secure data deletion and firmware availability. [https://energy-efficient-products.ec.europa.eu/product-list/servers-and-data-storage-products\\_en](https://energy-efficient-products.ec.europa.eu/product-list/servers-and-data-storage-products_en)

34. International Energy Agency, Electricity 2026, “Flexibility” : demand-side flexibility becomes increasingly important as variable renewable penetration rises. <https://www.iea.org/reports/electricity-2026/flexibility>

35. S&P Global, “Underwriting the Digital Backbone: Navigating Risk and Growth in Data Center Insurance” (2026), identifying location/aggregation, supply-chain, power infrastructure, project-finance and credit risks. <https://www.spglobal.com/energy/en/events/webinars/underwriting-the-digital-backbone-navigating-risk-and-growth-in-data-center-insurance>

36. US FCC materials on orbital data-centre applications; NASA/UNOOSA materials on orbital debris and space sustainability. This paper treats orbital compute as an emerging governance question rather than an established hyperscale alternative.