上海现代服务业联合会
Shanghai Services Federation

荣续智库

零碳产城融合项目发展白皮书

摘要

产城融合项目，正逐渐成为城市高质量发展的引擎。它打破产业与城市发展的边界，以产业为骨、城市为脉，重塑空间价值。从核心要素探寻到海外经验镜鉴，从技术赋能到趋势洞察，本书聚焦产城融合项目，解码其与可持续发展共生逻辑。期望为城市规划者、产业开发者点亮灵感，共探产城相融、城乡共兴、生态共美的发展新篇，让产业和城市不再是孤立的经济单元，而是活力永续的有机融合体。



PREFACE

前言

在城镇化进程加速推进与产业结构深度调整的过程中，产城融合项目打破了长期以来产业园区“重产轻城”、城市空间“产城割裂”的发展困局，以产业为核、以城市为基，构建起经济活力迸发、生活品质优越、生态环境友好的发展新范式，深度关乎区域经济竞争力提升、社会民生福祉增进与可持续发展目标达成。

我们试图跳出单一领域的研究视角，从多维度、系统性层面梳理产城融合项目的发展逻辑。剖析核心要素时，聚焦产业生态构建、空间功能耦合、公共服务配套等关键维度，明晰产业与城市协同发展的底层逻辑；回溯国外经验时，深入挖掘不同国家、不同发展阶段产城融合实践的成功密码，既萃取适配本土场景的先进理念，也反思异域模式本土化过程中的适配性挑战；探究技术赋能路径时，紧盯数字化、智能化、绿色化技术浪潮，解码新技术如何重塑园区产业形态、运营模式与生态本底，为园区转型注入创新动能；前瞻未来趋势时，立足“双碳”目标、城乡融合、区域协同等时代背景，锚定产城融合与可持续发展深度融合的方向，探索园区从经济增长极向城市有机生命体演进的路径 。

期待通过对产城融合项目全生命周期的深度剖析，能实现产业发展有温度、城市生活有质感、生态环境有韧性的美好愿景。

ANALYST

研究员

陈　菡	高级注册ESG分析师：25RZQLKC00473A
王艳荣	高级注册ESG分析师：24RZQLKC005010A
	国际通用ESG策略师：SH1928FCA0433
	碳管理师：CHINAETSCM20250010066
李恒沛	高级注册ESG分析师：25RZQLKC000532A
张亦恺	高级注册ESG分析师：25RZQLKC001033A
张伟娟	高级注册ESG分析师：24RZQLKC600662A
侯德山	高级注册ESG分析师：23RZQLKC003209A
	国际通用ESG策略师：SH12050FCA0442
万红军	高级注册ESG分析师：23RZQLKC002073A
	国际通用ESG策略师：SH4538FCA0479
王帅宗	CFA ESG证书：102263367
	国际通用ESG策略师：SH1218FCA0509
周　璇	高级注册ESG分析师：2SRZQLKC000582A
	国际通用ESG策略师：SH0062FCA0484
王亦聪	CFA ESG证书：118287047
高培杰	高级注册ESG分析师：24RZQLKC603345A
	国际通用ESG策略师：SH3210FCA0459

CONTENTS

目录



第一章　零碳产城融合项目的核心要素

07　产城融合项目的功能空间

11　能源系统的零碳化

13　集约化与智能化的基建体系

14　以产业转型推动零碳技术的发展

17　利益相关方的参与

第二章　国外产城融合项目的发展经验

21　日本产城融合项目的发展情况

34　新加坡产城融合项目的发展情况

第三章　产城融合项目与可持续发展

53　产城融合项目的相关政策

61　产城融合项目的核心议题

第四章　产城融合项目的技术利用

73　能源管理

77　可再生能源例用

84　设备改造

87　循环经济

91　智慧交通

91　无废城市

第五章 产城融合项目的发展趋势

第一章 零碳产城融合项目的核心要素

随着全球气候变化的加剧和可持续发展目标的提出，零碳经济作为应对气候变化和推进可持续发展的重要趋势，已被越来越多的国家和地区所采纳。

2024 年中央经济工作会议首次提到“零碳园区”的概念。会议确定，2025 年要抓好的重点任务就包括“建立一批零碳园区，推动全国碳市场建设，建立产品碳足迹管理体系、碳标识认证制度。”

产城融合项目作为一种创新的园区发展模式，有机融合产业发展与城市建设，以实现生产、生活、生态的和谐共生为目标。这种模式以产业为根基，以城市为载体，打破了传统产业园区与城市之间的隔阂，促进了功能、空间和人口等多维度的深度融合，构建起宜居宜业的理想发展格局。

产城融合项目的诞生，有效解决了传统产业园区与城市发展相互脱节的问题。它整合了产业发展、城市建设、人口集聚以及社会服务等功能，不仅是产业的集聚地，更是集居住、商业、休闲、教育、医疗等多功能于一体的综合性区域。在这里，人们在工作之余能够便捷地满足生活各方面的需求，形成了“产、城、人” 相互促进、协同发展的良好局面。

零碳产城融合项目，是在产城融合的基础上，将 “碳中和” 理念全面融入规划、建设、运营的全生命周期。通过综合运用节能、减排、固碳、碳汇、碳交易等多种手段，以及能源、产业、建筑、交通、生态等多领域的技术工艺集成应用和管理机制创新实践，致力于在一定周期（通常为一年）内，最大程度减少区域范围内直接或间接产生的二氧化碳排放总量。实现路径包括借助清洁技术支持、优化能源结构、推动产业低碳转型、加强资源循环利用等，同时积极探索碳汇和碳抵消机制，以达成或无限接近 “零排放”，打造现代化的产城融合项目典范。

第一节 产城融合园的功能空间

零碳产城融合项目在规划设计时，考虑土地利用效率、功能布局、交通系统优化、生态环境保护和修复等方面内容，提升园区生态系统碳汇能力。园区配套设施规划符合产业发展，产业规划发展融入城市发展，形成产业与城市高度融合、相辅相成的空间。

土地利用规划注重用地性质的混合，能够有效提升土地利用效率，实现集约节约利用土地，避免城市建设无序扩张。产业区、居住区、绿地等功能布局的充分融合，能够促进职住平衡，减少通勤的碳排放。

园区景观环境设计应在创造人性化空间的基础上，采用生态手法，不对区域环境气候造成破坏。园区内的绿化项目等可适当结合碳抵消项目同步规划设计。

构建集约高效、绿色低碳、便捷舒适的交通网络，规划完善的公共交通系统和慢行系统，充分考虑电动车配套设施。

生态保护规划策略运用，通过基础设施设计降低环境影响，生态廊道布局加强生物多样性保护，海绵城市理念应用提升应对雨水带来的自然灾害能力。

一、功能空间体系

用地规划是统领园区规划的前置条件。产城融合零碳园区旨在创造一个既有利于产业发展又满足居民生活需求的综合性空间。因此，用地规划时不仅要注重产业的集聚和经济增长，还要强调生态环境的可持续性城市服务的完善以及居民生活质量的提升。

1. 功能混合与集约开发

作为一个功能复合型园区空间，其碳排放场景更加复杂、多元。尤其是对于生产物流型、商务办公型园区的零碳场景而言，应该通过紧凑用地布局和复合的功能规划，尽可能增加园区内的慢行交通和生态绿地。在规划布局中做到公共设施可达，严格执行 5 分钟、10 分钟、15 分钟生活圈设施布局，从源头减少不必要的远距离出行，从而统筹产业区与生活区。

地块开发时建议利用新型产业用地 M0（研发+中试+总部办公+人才公寓）、M4（智能工厂+共享实验室+创客空间）、F3（商业服务+文体设施+社区医疗）用地等混合利用，满足职住平衡，确保混合功能用地占总体用地的 50%以上。这种布局可以减少居民和企业员工的通勤距离，降低交通碳排放。例如，《广东省低碳生态城市规划建设指引》就提出了空间维度的功能混合与时间维度的“7-24”（7 天-24 小时）活动模式，力争打造功能混合的活力中心，空间的布局将更多强调不同功能之间的互动和整合，提供公共空间供人们相遇、停留、交流和聚会。在活力中心区域传统的商务商业功能的基础上，以餐饮、娱乐、休闲、文化功能为重点，在一定区域内提供多种可选择的设施，保持中央区域长时间活动。

2. 临近城市功能区开发

在满足环境保护要求的前提下，园区应优先选择毗邻具有相对完善的居住、商业和公共服务功能的城市片区进行开发，不应采用远离城区的“孤岛”式开发模式。这有助于充分利用城市现有基础设施，减少重复建设，通过空间耦合实现"生产-生活-生态"三生融合，降低园区的建设和运营成本。

例如中新天津生态城就通过水务系统集成打造了“海绵城市+中水回用”复合系统，在此基础上建立了分质供水体系，工业再生水回用率超 90%，并与市政管网形成双闭环。又如鹿特丹港循环经济园区通过固废协同处理构建了"工业副产品-城市废弃物"物质流图谱，将港口拆解废钢与城市建筑垃圾共同熔炼，年处理量可达 200 万吨。而北京未来科学城在 2 公里半径内布局国家实验室，通过打造企业研发中心和科技孵化器而形成了"基础研究-应用开发-产业化"创新链，实现了产城融合项目中产业创新要素的流动。

3. 公共交通导向开发

园区应建立以公共交通为导向（TOD，Transit-oriented development）的空间结构，围绕公共交通枢纽建立园区的服务中心体系，提高开发强度。结合公共交通廊道，重点围绕轨道交通周边地区、快速公交和有轨电车站点周边地区，采用高强度集约化的开发模式，通过土地使用和交通政策来协调城市发展过程中产生的交通拥堵和用地不足的矛盾、提升商业效益。

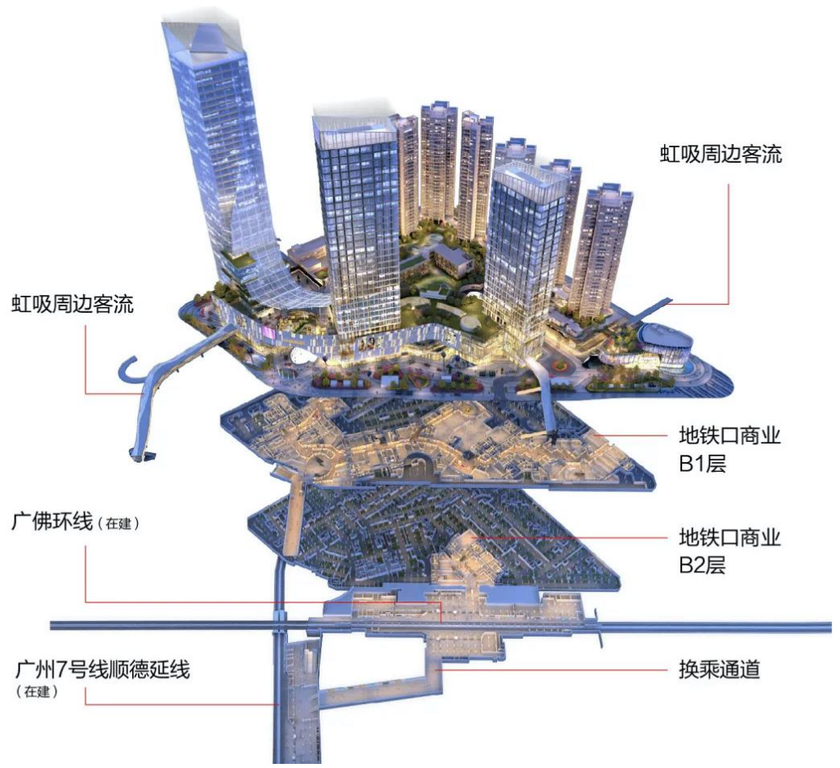
例如深圳前海枢纽规划设计提出以乘客体验为核心、站城融合发展的规划设计理念，通过构建"轨道+BRT+慢行"三级网络实现轨道接驳时间小于 5 分钟。新加坡裕廊湖区通过垂直森林立体绿化体系设计实现屋顶绿化率超过 30%，提升碳汇 15%。上海虹桥商务区通过打造空铁联运枢纽+光伏连廊系统，使得城市空间以“站包城”的形式嵌入出发层与到达层，通过设置特色商业打造各类人群聚集活力的半室外慢行街区及市域铁路站厅区，形成具有全时活力的“城市会客厅”。

4. 生态绿地

零碳园区规划要合理布局绿地空间。结合园区使用人口分布，合理布局开放空间、集中绿地，单个公共开放空间的面积宜大于 400 平方米。构建蓝绿交织的园区生态廊道，形成有效的通风廊道，改善通风效果，降低建筑空调能耗。结合绿地生态系统的网络构建，打造滨水廊道等微气候调节手段，对园区进行减碳规划设计。例如，雄安新区启动区将园区生态廊道与城市公园体系无缝衔接，将创新坊的雨水花园与市民中心的中央绿轴形成连续生态系统，实现了生态服务功能的外溢，取得了良好的社会效益。

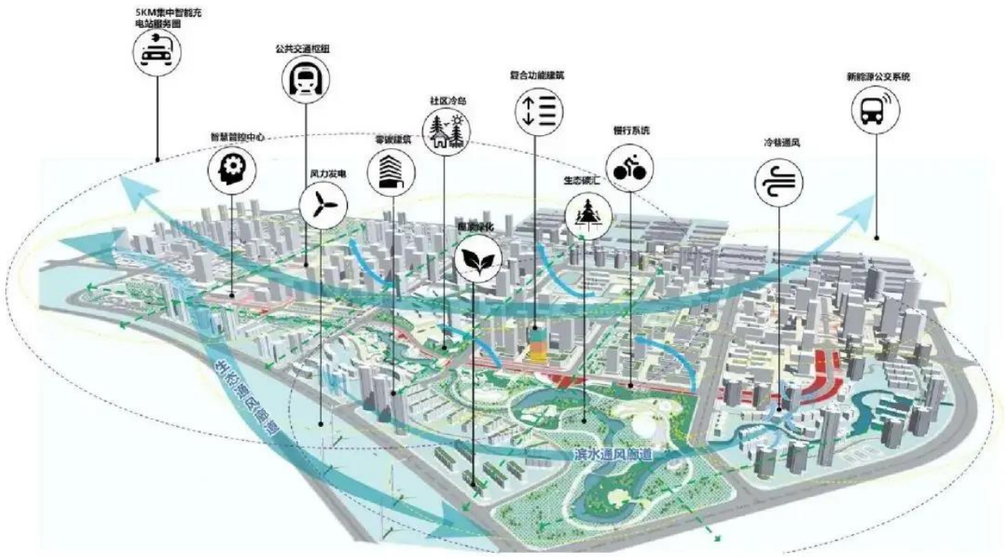
其次，要选择固碳能力强的植被。选用当地固碳能力强的植被群落，提升绿地中乔木的比例、增大乔木规格和数量，获取最大固碳效益。同时，减少碳足迹，选用当地材料或植栽，减少能源消耗。例如德国鲁尔区的改造中，将废弃矿坑改造为城市森林，既作为园区碳汇基地，又承担了市民的休闲功能，实现了碳汇空间的复合利用。此外，还要增加非硬化土壤面积。通过采取屋顶绿化、垂直绿化等措施，丰富绿植形式，提升场地绿植的固碳效益，增加非硬化土壤面积，提高园区植被和土壤碳储量能力。

图 1：TOD 项目示意图



来源：搜狐网

图 2：产城融合项目零碳场景模型



来源：IESPlaza

第二节 能源系统的零碳化

园区能源结构多以传统能源为主，且随着社会发展，能源消耗总量需求会逐年增加。加快能源供应链优化升级是减少园区碳排放的重要方面，主要通过优化能源结构和提升能源使用效率，来实现能源的绿色低碳转型。

传统产业清洁化改造可以采用能源替代、工艺优化、设备升级、碳捕获技术应用、资源循环利用等措施。能源替代方面，包括园区引入电锅炉或生物质锅炉代替燃煤锅炉，可再生能源规模化应用（如太阳能、风能、水能、地热等），余热回收系统等，辅以储能技术（如氢能、电池储能），保障稳定供应。

建设智慧能源网络，通过智能电网、微电网技术实现多能互补，结合数字化平台动态优化供需匹配，提升能源利用效率。推广工业固废资源化、污水再生利用，实现园区污染排放不断减量。

1. 大力发展可再生能源

根据园区所在区域的资源禀赋，合理布局分布式光伏、风电、生物质发电等零碳发电设施。降低石油、煤炭等化石能源比重，适宜地区可采用地源热泵、空气源热泵，冬季作为热泵供热的热源和夏季制冷的冷源。同时要鼓励园区企业和居民使用清洁能源，逐步降低对传统化石能源的依赖。通过政策引导和市场机制，提高可再生能源在能源消费中的占比。例如，青岛中德生态园充分利用良好的日照条件，在屋顶、空地等空间安装太阳能光伏板，分布式光伏装机规模达 16 兆瓦。雄安新区产城融合示范区建筑光伏一体化（BIPV）覆盖率超 60%，2024 年地热供暖覆盖率达 90%。

2. 建设综合能源站与智能微电网

园区实现低碳化、零碳化的关键在于提高清洁能源的利用率。考虑到风光等可再生能源发电的波动性和间歇性，一方面要推进建设多能互补的综合能源站，实现冷、热、电等多种能源的协同供应，保证能源的梯级利用和供能可靠性。例如晶澳晶山园区将生产环节余热用于区域供暖（覆盖 200 万㎡建筑）、制冷（溴化锂机组供冷）及温室农业；通过热泵技术提升低品位热能利用率，综合能效达 85%以上。

另一方面要构建智能微电网，以智能微网为枢纽平台，以源网荷储互动和多能互补为支撑，以清洁低碳、安全可控、灵活高效、智能友好、开放互动的特性，助力园区新能源发挥主体地位。例如，北京亦庄碳中和智慧园区绿色微电网系统内风电和光伏总发电量约 780 万 kWh，通过风光储联合优化运行，光伏、风电就地消纳电量约 725 万 kWh，可再生能源就地消纳比例达 93%；同时建设 0.7MW 微燃机，实现了天然气冷热电三联供。还参加了售电交易和京津冀辅助服务市场，市场化交易售电约 55 万 kWh。

3. 提升能源综合利用效率

结合园区内的生产流程和生活特征，将不同品位的能源进行摸底、盘查，分析能源循环过程，通过资源的优化配置和多能互补实现能源的梯级利用，最大化能源的综合利用效率。因此，要推动建设能源回收设施，综合利用园区及周边地区的蒸汽、余热等资源，促进供气、供热等公共基础设施共建共享；建设废弃物处理回收再利用设施、废水处理回收再利用设施、热交换或热泵系统，回收废热，建设废气过滤处理设施。

例如，内蒙古鄂尔多斯蒙苏经济开发区零碳产业园通过余热回收系统回收工业余热并提升蒸汽冷凝水回收效率，实现工业余能利用率达到 70%以上。同时，每年余热发电量相当于节约用电 303 万 kWh，减少化石能源消费 372 吨标煤，减少二氧化碳排放 1728 吨。

第三节 集约化与智能化的基建体系

建筑设计方面，推动园区建筑满足 LEED、BREEAM 或中国绿色建筑标准。例如，通过使用再生建筑材料等降低建筑材料的隐含碳，采用模块化设计、场外组装等手段，减少建筑建造过程中的隐含碳。又如，通过应用建筑光储直柔系统等，提升可再生能源利用率。

1. 建筑

绿色建筑是零碳园区的细胞，是产城融合的关键要素，可以通过屋顶光伏、光伏建筑一体化（BIPV）、地热能等可再生能源利用，推动园区能源清洁化转型。由于绿色建筑通常需要整合被动式节能（如自然通风、隔热设计）、主动式节能（如高效空调系统）和智能化技术（如 BIM、能源管理系统），因此可以成为低碳技术应用的典型示范场景。为此，短期园区内新建民用建筑、工业建筑均应执行绿色建筑标准，新建公共和住宅建筑中绝大多数执行二星级及以上标准，并将建筑的电气化率提升至 60%以上。中长期应尽可能实现建筑全生命周期近零碳排放，并全面普及光伏建筑一体化、装配式建筑和智慧管理系统。

在实施路径上，在建筑规划设计阶段，充分考虑自然采光、自然通风、保温隔热等因素，合理布局建筑平面、朝向和间距。采用先进的节能技术和材料（如高效保温结构、节能门窗等），打造被动式超低能耗建筑。通过推广屋顶光伏、光伏幕墙（BIPV）和地源热泵，实现建筑能源自给自足，形成近零能耗建筑、零能耗建筑试点示范。例如，江苏省常州市要求到到 2025 年，新建公共机构建筑可安装光伏屋顶面积实现光伏覆盖率达到 50%，新建民用建筑光伏覆盖率力争达到 100%。此外，还要积极推广建筑用能智慧管理体系，为建筑安装智能能源管理系统，对建筑的能耗进行实时监测和分析，实现能源的精细化管理。通过优化建筑设备的运行策略，降低建筑的能源消耗。

2. 交通

在零碳产城融合项目中，交通领域是连接生产、生活与生态的关键纽带。其碳排放主要来自物流运输、通勤车辆和工程机械。需通过推广新能源车辆（EV、氢能车）、优化运输结构（如“公转铁”、“公转水”）来减少对化石能源的依赖；通过与园区电力系统的互动促进绿电的消纳，发挥能源网络协同节点的作用，降低园区的直接碳排放。为此，短期内应快速提升园区车辆的电动化率，而中长期则应以打造“车-路-云”协同的智能网联交通系统和车网互动的示范应用为核心，推动交通与能源、建筑系统的深度融合。

在实施路径上，需建设配套交通基础设施，增设充电桩、加气站、加氢站等，做好充电设施预留接口与停车场区域总体布局，建设智能高效的公共充电基础设施网络，并与园区内智能微电网协同优化运行。例如，深圳光明科学城通过 V2G（车辆到电网）技术，将电动汽车电池作为分布式储能单元，平抑电网峰谷波动。还可通过多式联运、共享出行构建“步行+骑行+公共交通”为主导的绿色出行体系，并通过智慧调度来提高物流效率并减少无效交通。例如，苏州工业园区通过新能源物流车替代柴油车实现显著的降碳效果；而重庆两江新区依托数字孪生平台优化货运路线，降低园区内货车空驶率 35%。

第四节 以产业转型推动零碳技术的发展

零碳技术应用是园区降碳减排的重要技术支撑。零碳产城融合项目的零碳技术主要涉及可再生能源技术、能源储存与调节技术、工业脱碳技术、数字化碳管理技术、政策与市场工具等。推动产业结构优化，引入新型低碳产业，推动传统产业升级，不断提升产业园区和产业集群循环化水平。

同时，在产业设计上，通过绿色产业链规划，建立园区产业准入制度，引入绿色低碳产业，如可再生能源产业、绿色制造产业、环保科技产业、与循环经济相关的废物资源化利用产业、大数据和云计算等数字产业、电动汽车及配套产业、绿色建筑产业、低碳服务业等。

1. 低碳转型

在建设零碳产城融合项目时，企业引进与产业转型需以“双碳目标”为导向，通过政策引导、生态构建、技术赋能和利益共享机制，形成低碳数字化产业集群。针对园区定位明确重点发展的低碳产业（如新能源、智能装备、碳捕捉技术）和数字化服务（如工业互联网、能源管理平台），按“补链-强链-延链”需求定向招商。同时，引入行业龙头作为“链主”，带动中小企业集群化转型，并制定企业入园“低碳门槛”，要求承诺碳减排目标或使用绿电比例，从而绘制明确的零碳产业链图谱。例如，常州溧阳动力电池产业园围绕宁德时代，吸引贝特瑞（负极材料）、科达利（结构件）等 50 余家上下游企业入驻，形成从材料到回收的完整产业链，单位产值碳排放下降 40%。

在实施路径上，围绕绿色技术改造，对园区现有企业实施清洁生产改造，推动企业接入园区分布式光伏、储能系统，推广余热回收、氢能煅烧等工艺，鼓励企业采用先进的节能技术和设备，降低生产过程中的能源消耗和碳排放。还需注重建设园区级资源循环利用中心，园区内建立垃圾分类、有害物质处理、有机废弃物堆肥等废弃物处理设施，实现废弃物的减量化、资源化和无害化处理。推广资源回收利用，鼓励园区企业和居民参与废弃物和资源的回收利用，提高资源回收率。同时，与周边社区开展循环经济合作，实现资源的共享和循环利用。另一方面，要积极需求绿色金融的支持，例如联合金融机构推出“碳效贷”，将贷款利率与企业碳效等级挂钩。

在企业的工艺优化与技术升级层面，例如，化工行业采用更高效的电催化、光催化等低碳反应技术，替代高温高压工艺，减少能耗；纺织业用无水染色、生物酶处理等技术，减少水耗和化学品使用，通过改进废水处理系统减少污水排放；建材企业推广低碳水泥（如富氧燃烧技术）、建筑光伏一体化（BIPV）技术应用。

优化产业链上下游产业布局，发展循环经济模式，也是方式之一。构建“生产-消费-再生”闭环，建立产业间物料、能源梯级利用网络。如在钢铁、水泥等高排放行业试点碳捕集，捕集的 CO_2用于制备合成燃料、食品级干冰；引进再生建筑材料企业，回收和再利用园区废弃的工业、建筑和生活废料，生产成再生建筑材料；建设集中式水处理中心，实现园区内部中水回用。

2. 数字化转型

基于园区复杂的能流、物质流和资金流，要提前规划各子系统的数字化管理平台，采用统一技术架构打通各子系统的数据，建设园区的智慧大脑与数据中心。建设园区工业互联网平台、5G 专网、边缘计算节点等基础设施，降低企业数字化成本。基于数据底座和人工智能技术为生产环节、供应链环节进行场景化赋能。推广数字孪生、AI 质检等应用，同时注意构建区块链溯源系统，建立数据交易机制，在推动企业间数据共享的同时实现全链条碳足迹透明化。

在实施路径上，要搭建园区级碳管理平台，集成企业能耗、生产数据，提供碳核算、预警与优化服务。例如，杭州青山湖科技城通过“产业大脑”动态监测 300 家企业碳排，AI 推荐节能方案，年减碳 6.2 万吨。而无锡高新区的“纺织行业碳足迹平台则”覆盖了从原料到成衣的 300 余个环节，助力出口企业应对欧盟碳关税。帮助企业开发 CCER、绿证等碳资产，参与碳交易，促进绿色金融商业模式创新。例如，福建三明林业碳汇园区引导企业购买林业碳汇抵消排放，年交易额超 5000 万元。此外，通过虚拟电厂管理平台实时调节屋顶光伏、可调负荷、储能等分布式资源，实时匹配交通用能需求与可再生能源出力，并通过参与电力市场交易促进园区低碳经济的可持续发展。例如，在苏州工业园区，建筑光伏发电接入微电网，优先供给公交充电站；通过智慧平台调控建筑空调负荷，为交通用电预留绿电配额。此外，园区还通过“SIP-AI 智脑”平台整合 2000 家企业数据，提供能耗优化、供应链协同等服务，推动规上企业数字化覆盖率超 90%，年减碳超 50 万吨。

3. 管理运维

零碳产城融合项目的运维管理是提升园区资产价值、降低运营成本、规避长期风险、吸引优质租户的战略选择。通过管理，不断优化园区技术经济性、抓住政策窗口期，满足市场需求变化。

园区通过碳资产管理系统，整合碳核算、碳交易功能，帮助园区实现碳配额管理。园区管理方为每家企业设定碳配额，允许内部碳交易，激励超额减排；对园区现有产业进行全面碳排放审计，明确主要排放源（如能源消耗、生产工艺、废弃物处理等）；制定分阶段减排目标，优先处理高碳排放环节。利用 IoT 大数据平台，通过传感器实时监控碳排放、能耗、设备状态等数据，实现园区碳排放动态监测。对难以削减的排放量，通过购买 CCER、投资碳汇项目实现中和。通过碳培训、共享成果数据提升整个园区各利益相关方参与度，建立园区专属碳账户、分级电价等激励机制，鼓励企业、社区家庭和个人的节能减碳行为。

第五节 利益相关方的参与

零碳产城融合项目比普通园区涉及更多的利益相关者，因此，利益相关者的管理也很重要。利益相关者包括政府、投资者、社区居民、企业客户、企业员工、游客等，园区应制定相应计划，平衡各方的利益，确保项目顺利推进。

一、公众参与

企业和居民环保意识的提升，社区参与低碳活动的比例提升，也会影响园区降碳的实际效果。

产城融合型园区与传统工业园区相比，存在较大比例居民生活过程中用电、用水、生活垃圾处理等产生的生活碳排放，如生活照明、加点设备用电，饮用、盥洗等家务用水，餐饮和包装产品使用产生的厨余和生活垃圾等。

建立碳普惠平台，通过居民绿色行为（节能、节水、垃圾分类等）可兑换园区商业服务权益，企业减排成果与社区共享等方式，实现企业-社区协同减碳。

通过公众教育与能力建设，设立零碳展示中心，开展企业碳管理培训，培育绿色消费文化（如低碳产品认证推广），大力提升社会参与和公众意识。

二、政策支撑

与政府协调，争取地方政府在土地、税收、审批等方面的政策支持；落实上位规划要求，与周边区域城市规划无缝衔接；通过碳核算培训、绿色供应链管理，获得入驻企业的低碳转型支持。通过社区参与，引导居民低碳生活方式。

通过财政补贴、法规要求等措施，促进传统产业改造。同时，建立监测体系，确保产业升级改造后的效果符合零碳标准。设计与园区特色和产业发展相匹配的碳排放监测和评估系统，为园区降碳行动提供定量支撑。确保目标的实现。

争取金融支持，通过绿色金融工具（绿色债券、碳减排贷款）的应用，政府补贴（如低碳园区试点资金）的获取，或者与金融机构合作，拓宽融资渠道；不断探索公私合作（PPP）、产业基金或 REITs 等模式的分摊风险与收益共享机制，实现资源的有效配置。

推行碳定价与交易机制，推动园区参与全国碳市场或建立园区内部碳定价机制。探索园区内部碳税、碳信用激励机制，利用园区碳资产管理系统，统一的监测和核算园区内各企业的碳排放，以及碳抵消项目减少的碳排放。



第二章 国外产城融合项目的发展经验

在产城融合项目的探索之路上，日本与新加坡凭借成熟的发展模式，积累了诸多值得我们深入研究、借鉴的宝贵经验。

第一节 日本产城融合项目的发展情况

日本作为全球产城融合发展的先驱国家，其经验经历了从重工业集聚到科技创新驱动、再到城乡协同的演变过程。以下结合不同时期的政策导向、典型案例及特征，将日本产城融合划分为四个主要阶段：

一、早期探索与重工业集聚阶段（20 世纪 50-70 年代）

1. 政策支持：国家战略驱动的工业化布局

《国民所得倍增计划》（1960 年）与《全国综合开发计划》（1962 年）

日本政府通过这两项核心政策，明确将太平洋沿岸的港口城市作为工业发展轴心，优先布局钢铁、造船、石化等重工业。政府通过财政补贴、税收减免、外汇配额等手段，引导企业向沿海地区集聚，形成以“大进大出”为特征的工业模式。例如，钢铁企业选择在港口附近设厂以降低铁矿石进口成本，大阪港的填海造陆工程被列为国家重点项目，直接服务于重工业用地需求。

通产省（MITI）的垂直整合战略

通产省通过“行政指导”强制推动产业重组，淘汰落后产能（如传统纺织业），并集中资源扶持重工业。例如，1956 年推出的“电力五年计划”将石油发电作为国家能源战略核心，促使阪神、中京等工业区形成石化产业集群。此外，政府通过《机械工业振兴临时措施法》（1956 年）等法规，鼓励企业引进欧美技术并进行本土化创新，如三菱重工在朝鲜战争中承接美军订单，快速积累技术能力。

基础设施与交通网络建设

政府投资建设东海道新干线（1964 年通车）和高速公路网，将东京、名古屋、大阪、北九州四大工业区串联为“太平洋工业带”。这一交通网络不仅降低了原材料与成品的运输成本，还加速了劳动力向沿海城市流动。例如，1960 年代名古屋港的扩建使其成为日本第二大汽车出口港，丰田市依托港口和铁路枢纽形成“汽车城”格局。

2. 产业与城市空间的融合特征

“企业城下町”模式的形成

以核心企业为中心，形成“大企业+中小企业集群”的垂直分工体系。例如：

- 丰田市：丰田汽车总部所在地，围绕其布局了数百家零部件供应商（如富士精工、NISHIMURA 模具公司），形成“30 分钟供应链圈”。政府通过土地划拨和税收优惠，将工厂与员工住宅区一体化规划，甚至将城市道路设计为适应零部件运输需求。
- 日立市：日立制作所主导的电子工业集群，带动周边发展出精密机械和半导体配套产业，城市人口在 1950-1970 年间增长近 3 倍，成为“产城融合”的典型。

填海造陆与工业用地扩展

为解决土地短缺问题，日本大规模填海造陆以扩展工业空间：

- 大阪港“梦洲・咲洲地区”：1950 年代启动填海工程，至 1970 年代建成占地约 15 平方公里的人工岛，集中布局石化储罐区、物流仓库和火力发电厂。政府通过《港湾法》赋予港口区域特殊税收政策，吸引住友化学、三井物产等企业入驻，形成关西地区能源与化工枢纽。
- 北九州工业地带：依托洞海湾填海工程，将原有分散的钢铁厂整合为八幡制铁所（现新日铁）为核心的联合体，并通过专用铁路与港口连接，实现“原料进口—冶炼—成品出口”的一体化流程。

劳动力与城市社会结构变迁

工业集聚催生了“公司城”社会形态，企业通过“终身雇佣制”绑定员工，并配套建设职工宿舍、学校、医院等设施。例如，松下电器在大阪门真市设立总部时，同步规划了员工社区，形成“工厂即家园”的封闭式生活圈。

农村人口大规模向工业城市迁移。1955-1970 年，太平洋沿岸城市人口占比从 35%上升至 65%，东京、大阪等地的“团地”（集体住宅区）成为工人阶层聚居的典型空间。

3. 典型案例

太平洋工业带的纵向产业链整合

以汽车产业为例，丰田汽车通过“下请制度”与中小企业建立长期契约关系，形成“金字塔式”供应链。一级供应商（如电装、爱信精机）直接对接整车厂，二级以下供应商则分布在爱知县、静冈县等周边区域。政府通过《中小企业现代化促进法》（1963 年）支持中小企业技术升级，确保产业链整体竞争力。

图 3：太平洋工业地带覆盖区域及部分城市示意



来源：日本国土交通省

大阪港的产城协同效应

填海区域不仅承载重工业，还通过“临海副都心计划”引入商业与居住功能。例如，1970 年代后期，咲洲地区开始建设国际会展中心和高端住宅区，吸引三菱商事、伊藤忠等企业总部迁入，实现“工业—服务业—居住”的空间复合利用。

二、科技新城与产城一体化阶段（20 世纪 80-90 年代）

1. 政策支持：从顶层设计到制度创新

立法保障与特区制度

《筑波研究学园都市建设法》（1984 年修订）：明确将筑波定位为“国家科研中枢”，规定科研机构、教育设施与生活配套的协同布局，并赋予其税收减免、土地开发优先权等政策支持。

- “综合特区制度”：在横滨智慧港城等区域实施，通过放宽外资准入、简化行政审批、提供研发补贴等方式吸引生命科学、机器人等新兴产业集聚。例如，横滨港区通过税收优惠吸引了包括安斯泰来制药在内的跨国企业设立研发中心。
- 《关西文化学术研究都市建设促进法》（1987 年）：推动京阪奈科学城的跨区域合作，由京都府、大阪府和奈良县共同出资，中央政府提供税收支持，形成“地方政府主导+民间资本参与”的混合模式。

地方政府的协同机制

以京阪奈科学城为例，其开发采取地方政府主导、跨区域合作模式，成立公益财团法人“关西文化学术研究都市推进机构”，协调京都、大阪、奈良三地资源，并通过地方债和民间资金共同筹措建设经费。横滨港未来 21（MM21）则通过《第四次首都圈基本规划》（1986 年）被定位为“业务核都市”，强调职住平衡和城市功能自立，政府主导土地整理后引入民营企业参与开发。

资金与金融扶持

- 筑波科学城在 80 年代获得全国 40%的政府科研预算，累计投入超过 2 万亿日元用于基础设施建设与科研机构搬迁。
- 京阪奈科学城通过发行地方债和设立公益财团法人“关西文化学术研究都市推进机构”，整合民间资本与政府资金，支持中小企业研发孵化。

国际战略与交通基建配套

日本将筑波科学城和横滨港未来 21 纳入“国际战略综合特区”，通过国际博览会（如 1985 年筑波世博会）提升知名度，并完善轨道交通网络。例如，筑波快线（2005 年开通）缩短了与东京的通勤时间，横滨 MM21 通过“站城一体化”模式（如港区未来站）构建 TOD 网络，强化商务与居住功能的衔接。

2. 产业与城市空间的融合特征

功能混合与社区化布局

- 科研与居住的嵌套：以“多核分散”结构规划，科研机构（如理化学研究所）、大学（筑波大学）与住宅区混合布局，形成“中心公园+放射状社区”的规划和“研究—教育—生活”闭环。例如，科学城中心区集中了行政与文化设施，外围分布同志社大学等高校校区及配套住宅区，实现“步行 15 分钟生活圈”；公务员宿舍区初期采用低密度设计，后期调整为高层公寓和商业综合体，提升土地利用效率。
- 产业与服务的协同：横滨智慧港城在港口区嵌入“智能物流+研发中心+商业综合体”，通过 TOD 模式将樱木町站、港区未来站打造为“商务枢纽”，周边集聚三菱重工、富士通等企业总部，同时配套购物中心（如地标大厦）、文化设施（横滨美术馆）和滨水休闲区，形成“工作—消费—休闲”一体化空间。

交通与生态的统筹规划

- 筑波科学城通过建设专用轨道交通（筑波快线）连接东京都市圈，同时保留丘陵地带自然景观，40%的绿地覆盖率提升了宜居性。
- 京阪奈科学城为避免重复筑波早期交通不足的教训，在规划中预留新干线通道，但因地方协调问题未能实现，转而优化区域公路网络。

创新网络与产业升级

- 垂直整合向开放创新转型：筑波初期以国立机构为主，成果转化率低。90 年代通过“新筑波计划”引入民间企业与国际合作，例如理化学研究所（RIKEN）与索尼联合开展材料科学研究。
- 新兴产业集群培育：横滨 MM21 依托港口优势，转型为生命科学、新能源和机器人产业聚集地。例如，梦洲地区利用填海土地建设太阳能发电基地，并吸引医药研发企业入驻，形成“绿色革新”产业集群。

生态与人文环境的协同设计

- 生态城市理念：筑波科学城保留丘陵和湿地景观，建设区域供热系统和地下综合管廊，减少环境负荷；横滨 MM21 通过“购物中心公园”步行轴线串联绿地与滨水空间，塑造亲自然城市形象。
- 文化赋能产业：京阪奈科学城将平城宫迹复原工程与科技园区结合，打造“文化学术研究都市”；横滨 MM21 以日本丸纪念公园、帆船博物馆等文化地标提升区域吸引力，促进旅游与产业联动。

3. 典型案例

筑波科学城

图 4：筑波科学城区位示意图



来源：北京规划自然资源

- 政府主导的科研中枢：聚集了 46 个国家级研究机构（如高能加速器研究所）和筑波大学，形成基础科研高地。但初期因市场化不足导致 GDP 增长缓慢（1998 年仅 50 亿美元），后期通过引入企业合作改善。
- 社会实验属性：作为“乌托邦式科学城”，其规划强调社会公平，例如住宅标准高于东京，且未拆迁一户原住民，增强了社区认同。

京阪奈科学城（关西文化学术研究都市）

- 跨区域协作典范：由两府一县联合管理，设立 12 个特色分区域（如奈良的“文化传承区”与大阪的“高科技制造区”），2019 年入驻企业 140 家，研究人员超 9000 人。
- 民间资本驱动：通过“京阪奈株式会社”运营孵化器，吸引中小型研发企业（80%为研发型），形成从大企业主导到创新生态的转型。

横滨智慧港城

- 港口经济升级：将传统货运港转型为“生命科学+AI”研发中心，例如吸引武田药品工业设立全球研发总部，并配套建设国际学校与医疗中心。
- 环境友好设计：保留海滨生态，通过地下管廊整合能源与数据网络，成为“智能城市”样板。

三、转型与创新驱动阶段（21 世纪初至今）

1. 政策支持：从数字化战略到绿色转型

日本在 21 世纪初面临全球化竞争加剧、人口老龄化与乡村空心化的多重挑战，政策重心转向数字化、绿色化与地方创生三大方向，通过制度创新重构产城融合模式。

数字化战略与智慧城市政策

- “社会 5.0”国家愿景：2016 年提出的“社会 5.0”概念，强调通过数字技术实现经济发展与社会问题解决的协同，智慧城市成为核心试验田。2021 年《第 6 期科技创新基本计划》将智慧城市建设纳入国家战略，提出分三阶段推进：2025 年前实现基础服务覆盖、2030 年前深化服务应用、2030 年后完成城市整体变革。
- 数字厅的成立：2021 年设立数字厅，统筹数字化转型，目标到 2025 年实现政府服务全面线上化，但实际进展缓慢（2022 年仅 7.5%的政府程序可在线办理）。
- 地方创生与数字化结合：通过《数字田园城市国家构想》，将智慧城市与地方振兴结合，例如神奈川县小田原市通过区域微电网和太阳能发电打造“零碳数字城镇”，实现能源自给自足。

绿色转型与碳中和政策

- “领跑者制度”升级：以最高能效标准推动企业节能减排，如横河电机通过能源可视化系统实现产值翻倍而碳排放零增长。
- 零碳示范区建设：大阪梦咲地区依托“综合特区制度”，聚集新能源企业并实施税收减免，如太阳能发电项目覆盖 3200 户家庭用电需求。神奈川县横须贺市制定《2050 零碳城市行动计划》，通过太阳能与蓄电池实现公共设施零排放。

地方创生与财政激励

- “家乡税”制度深化：通过财政转移支付吸引城市居民支援乡村，如上士幌町 2014 年通过该制度募集资金达町税收入的 1.5 倍，用于教育与医疗设施建设。
- 《地方创生综合战略》：计划创造 30 万个地方就业岗位，推动“农业+X”模式，如静冈茶园结合种植、加工与观光，开发高附加值产品。

2. 产业与城市空间的融合特征

此阶段产城融合突破传统物理边界，形成“数字—能源—文化”三位一体的新型空间结构。

数字化基础设施与城市服务融合

- 数字孪生与智慧管理：日本国土交通省主导的 PLATEAU 项目，计划 2027 年前为 500 个城市构建三维数字模型，用于灾害模拟与自动驾驶测试（如沼津市的三维公交定位系统）。
- 制造业数字化转型：东大阪市中小型企业通过“SmaFac!”等应用实现无纸化生产；欧姆龙草津工厂采用低成本自动化（LCIA），以 1/10 成本完成 50%工序自动化，不良率降低 40%。

绿色能源网络与城市空间重构

- 氢能源社区实验：丰田“未来之城”（Woven City）规划三级道路系统，整合氢能源与自动驾驶技术，目标成为零排放社区原型。
- 区域微电网与可再生能源：小田原市通过太阳能电池板覆盖建筑与电动车运输系统，打造“零碳数字城镇”，并计划引入无人机配送服务。

地方特色产业与社区活化

- 第六产业创新：北海道东川町以“写真之町”定位，通过摄影节与自然景观开发吸引人口回流，2023 年青年移居率达历史新高。
- 官民协作优化空间规模：如 OGAL PLAZA 项目通过民间资本建设图书馆与诊所，避免政府过度投资，同时提升设施利用率与财政收入。

3. 典型案例

大阪梦咲地区：港口新城的绿色转型

原为填海形成的物流枢纽，2010 年定位“综合特区”，聚集生命科学、新能源企业，并享受 5 年固定资产税减免。其太阳能发电项目年供电量达 10 兆瓦，成为关西创新核心区。

神奈川县小田原市：零碳数字城镇

通过区域微电网整合太阳能与木结构建筑，计划 2030 年实现碳中和。该市被选为“脱碳先行地区”，获国家资金支持建设 EV 运输系统与无人机配送网络。

欧姆龙草津工厂：人机协同的智能制造

采用低成本自动化（LCIA），优先自动化重复工序（如检测），保留人工精密组装环节，实现效率提升 200%且不良率下降 40%，体现“省人化而非无人化”理念。

四、未来趋势：超级智慧城市与城乡共生

1. 全域数字化：超级智慧城市的“社会实验室”模式

日本在智慧城市领域的探索已从“技术验证”转向“社会系统重构”，其核心是通过数字化技术将城市运营、产业布局与居民生活深度整合。典型案例包括：

- 丰田“编织之城”（Woven City）：位于静冈县裾野市，该项目以“从零构建城市”为理念，将城市道路划分为步行、自动驾驶和低速交通工具专用三类通道，地下则设置物流专用网络，形成立体交通体系。所有建筑采用碳中和木材建造，屋顶覆盖太阳能板，并配备氢燃料电池系统，实现能源自给。城市内嵌的“都市操作系统（OS）”通过 5G 网络和数字孪生技术，实时采集居民行为数据，优化能源分配、交通调度及公共安全，形成“硬件设施—数字平台—居民行为”的闭环反馈机制。
- 吹田 SST（Suita Sustainable Smart Town）：由松下主导的大阪智慧城镇，以“能源、安全、交通、健康、社区”五大维度为核心，实现 100%可再生能源供能。其 AI 监控系统可实时检测老年人跌倒或滞留情况，结合分布式储能与电动车辆，确保灾害时 72 小时电力自持，成为“防灾韧性城市”的典范。
- 产业融合特征：这些项目不仅是技术试验场，更是产业孵化平台。例如，“编织之城”吸引全球科技企业入驻，共同开发自动驾驶、智能家居和健康监测技术；吹田 SST 则成为松下智能家居、能源管理系统的商业化应用场景，推动企业从“产品供应商”向“城市服务商”转型。

2. 城乡功能互补：地方创生 3.0 与都市圈辐射效应

面对人口萎缩与东京一极集中问题，日本通过“地方创生”政策升级版，构建“城市创新+乡村特色”的共生网络：

- “半农半 X”经济模式：在高知县、德岛县等地，年轻人以“农业+IT/设计/旅游”的复合业态扎根乡村。例如，德岛县上胜町将山林中的枫叶、椿叶加工为高端餐饮装饰品，年产值达 32 亿日元，并衍生出“红叶观光”产业链；高知县通过设计赋能栗子包装，提升产品附加值，形成地域品牌。

- 都市圈反向辐射：东京、大阪等都市圈通过 TOD（公共交通导向开发）模式向周边疏解功能。例如，横滨港未来 21（MM21）依托轨道交通节点，形成“商务 TOD—枢纽 TOD—文化 TOD”网络，吸引三菱重工、索尼等企业总部入驻，同时保留工业遗产改造的船坞公园，促进产、城、旅融合。神奈川县热海市则利用温泉资源与东京通勤圈优势，打造“工作日都市就业+周末乡村疗愈”的双栖生活模式，吸引远程办公群体。

- 空间融合特征：城乡边界逐渐模糊，形成“创新走廊+特色集群”的空间结构。例如，福岛县滨海地区整合浪江町氢能基地与海上风电项目，构建“风—光—氢—储”一体化能源带，既服务本地产业，又通过电网互联向东京输送清洁能源，实现城乡能源协同。

3. 产业与城市空间的深度融合

未来日本产城融合的核心在于“产业功能与城市空间的模块化嵌套”：

- 垂直化产业社区：如东京丰洲市场（Toyosu Market）将水产交易、加工、冷链物流与观光体验垂直整合，底层为拍卖区，中层设透明参观走廊，顶层布局餐饮与文创空间，形成“生产—消费—体验”一体化场景。

- 柔性化制造网络：大阪关西世博会园区规划中，采用可拆卸建筑与模块化基础设施，会后将转型为氢能研发中心，体现“临时性活动与永久性产业”的无缝衔接。

- 数据驱动的产城适配：丰田“编织之城”通过数字孪生技术模拟居民需求，动态调整商业设施布局与服务类型，例如依据健康数据预测增设社区诊所，或根据通勤流量优化自动驾驶路线。

4. 可持续韧性与全球化输出

日本未来城市强调“环境—经济—社会”三重可持续性：

- 碳中和技术的全域渗透：氢能社会构想下，福岛 FH2R 基地年产 900 吨绿氢，供应东京奥运会场馆及周边工业园区；北九州市通过智能电网整合工业余热与家庭储能，实现区域能源循环。

- 灾害韧性系统：吹田 SST 的分布式能源网络与横滨 MM21 的“T 型步行系统”均设计为灾时应急通道，确保城市功能的快速恢复。

- 模式全球化输出：日本通过“亚洲零碳共同体”倡议，向东南亚推广氢能枢纽与智慧社区建设经验。例如，在印尼复制“福岛模式”，利用地热资源制氢，结合日企技术建设零碳产业园。

日本零碳产城融合项目的发展路径核心特点在于结合灾后重建、技术创新与区域振兴需求，形成了以“技术实证—区域试点—全国推广—国际输出”为主线的阶段性发展模式。以下基于日本政策背景、技术特点和代表性案例，将其零碳产城融合进程划分为四个阶段。

一、灾后重建与技术萌芽阶段（2011-2015 年）

1. 背景与政策支持

2011 年东日本大地震及福岛核事故后，日本政府将“绿色复兴”纳入国家战略。2012 年《绿色增长战略》提出发展可再生能源与低碳技术，并在福岛县设立“创新海岸构想”，推动灾后地区向零碳经济转型。2013 年《可再生能源特别措施法》强化了太阳能、风能等领域的政策支持。

2. 技术特点

可再生能源试点：福岛县浪江町启动风能与太阳能发电项目，探索氢能应用（如福岛氢能研究基地 FH2R）。

低碳交通：东京羽村市 2012 年引入电动巴士，并配套光伏发电充电系统，实现交通领域“零碳化”试点。

3. 代表项目

福岛氢能研究基地（FH2R）：占地 18 万平方米，全球最大规模的可再生能源制氢设施，利用太阳能电解水生产氢气，年产能达 900 吨，为后续氢能产业链奠定基础。

羽村市“AZEMS”零碳交通系统：通过光伏发电与蓄电池结合，为电动巴士和电动汽车供电，减少对传统电网依赖，年减排二氧化碳约 100 吨。

二、技术研发与区域试点阶段（2016-2020 年）

1. 背景与政策支持

2016 年日本提出“氢能社会”愿景，2018 年《第五次能源基本计划》明确 2050 年碳中和目标。政府通过“区域共生・可再生能源推进基金”支持地方零碳园区建设，并推动企业技术商业化。

2. 技术特点

氢能应用扩展：氢燃料电池技术从交通向工业领域延伸，如三菱重工开发氢燃气轮机发电技术。

多能互补系统：园区内结合太阳能、风能、生物质能与储能技术，构建能源自给网络。

3. 代表项目

长崎碳中和产业园（三菱重工）：聚焦氢燃料、氨燃料及生物质合成燃料研发，建设制氢电解设备与二氧化碳回收设施，目标 2040 年实现零碳化。

福岛浪江町智慧社区：集成光伏发电、氢能管道与能源管理系统（BEMS），打造 100%可再生能源供能的产业园区，计划 2025 年全面运营。

三、规模化与碳中和目标推进阶段（2021-2030 年）

1. 背景与政策支持

2020 年日本宣布“2050 碳中和”目标，2021 年《绿色增长战略》细化氢能、碳循环等领域路线图。政府设立 2 万亿日元基金支持脱碳技术研发，并通过“地方创生”政策推动零碳园区与区域经济融合。

2. 技术特点

氢能商业化：企业如电装、松下开展纯氢燃料电池实证实验，目标 2030 年实现规模化应用。

CCUS 技术突破：三菱重工在长崎产业园推进二氧化碳捕集与甲烷合成技术，年处理能力达万吨级。

3. 代表项目

福岛滨海可再生能源产业带：整合浪江町氢能基地与海上风电项目，形成“风—光—氢—储”一体化能源体系，目标 2030 年供应福岛县 50%电力需求。

北九州智能城市：通过智能电网连接工业园区与居民区，实现能源需求动态调控，碳排放较 2013 年减少 40%。

四、全球示范与国际合作阶段（2031 年及未来）

1. 战略方向

技术输出：将氢能、CCUS 等技术纳入“亚洲零碳共同体”倡议，向东南亚推广。

国际标准制定：主导 APEC 框架下的零碳园区建设标准，强化日本在绿色金融与低碳技术领域的话语权。

2. 代表项目

JCM（联合信用机制）零碳园区：在印尼、越南等国复制福岛模式，结合当地资源建设氢能枢纽与智慧社区，目标 2035 年实现跨国碳中和合作。

大阪关西世博会零碳园区：以 100%可再生能源供能为核心，展示日本氢能公交、碳循环建筑等技术，塑造全球零碳标杆形象。

日本的经验表明，零碳产城融合需结合区域特点，通过技术创新与政策协同实现“经济—环境—社会”三重效益的平衡，为全球提供了一条兼顾技术实证与区域振兴的可行路径。

第二节 新加坡产城融合项目的发展情况

自 20 世纪 60 年代起，新加坡开启了产城融合项目的探索之旅，历经多年发展，其园区建设从最初单纯聚焦工业生产，逐步演变为产业、城市功能与生活空间深度融合的综合性发展模式，这一转变塑造了新加坡独特的城市风貌。

从新加坡产城融合的发展阶段来看，主要分成四个阶段

一、劳动密集型阶段

新加坡于 1961 年成立了经济发展局（Economic Development Board，简称 EDB），专门负责制定经济发展战略和招商引资。在 20 世纪 60 年代，新加坡政府在裕廊地区划定土地作为工业发展的载体，并首创工业园区的发展模式。这一阶段主要发展了服装、纺织、玩具、电子部件组装等劳动密集型产业。

图 5：新加坡 20 世纪 60 年代裕廊工业区



来源：澎湃新闻网

图 6：如今的裕廊工业区



来源：搜狐网

1. 政府政策

20 世纪 60 年代，新加坡政府制定了经济扩张刺激法案与土地征收法案，通过给予外国企业税费减免优惠，吸引外部投资。这些政策不仅促进了工业的发展，也为城市功能的完善提供了资金支持。政府通过土地政策（如土地征收和土地租赁）确保了工业区的顺利开发和建设。

政府大力投资于基础设施建设，包括标准厂房、港口、铁路、公路、电力和供水等。这些基础设施的完善为工业发展和城市功能的融合提供了坚实的基础。

2. 产业与城市功能融合的特点

土地利用与规划：新加坡政府通过将裕廊工业区的土地租赁吸引企业入驻。裕廊工业区的土地规划分为居住区、轻工业区和重工业区。这种分区规划有助于合理安排产业布局和城市功能，避免工业污染对居民生活的影响，同时也促进了产业的集聚发展。为了满足工人和居民的住房需求，新加坡政府在裕廊工业区及周边地区建设了大量的组屋。这些住房不仅解决了工人的居住问题，也促进了城市功能的完善和社区的形成。

产业布局与城市功能结合：裕廊工业区是这一时期产城融合的典型代表。裕廊工业区不仅发展工业，还配套了居住、教育、休闲、社区服务等城市功能。这种布局使得工人可以在园区内就近居住和生活，减少了通勤时间，提高了生活质量。

通过这些政策和措施，新加坡在 20 世纪 60 年代成功地实现了产业与城市功能的初步融合，为后续的经济发展和城市化奠定了坚实的基础。

二、技术密集型阶段（1979～1985 年）

20 世纪 70 年代，随着失业问题的解决及发展高附加值产业的需求，新加坡开始从劳动力密集型面向技术密集型转变。

1. 政府政策

工资增加政策：这一阶段，政府实施了三年的工资增加政策，变相地增加了园区内企业的运营成本。这一政策迫使企业改进生产工艺，逐步淘汰落后的劳动密集型产业，发展技术型产业。

土地政策的调整：政府重新区划土地用地体系和增添白地[1]理念，增加土地使用的灵活性，以适应产业发展的需要。调整后的新型产业用地功能高度混合，可以兼容商务、商业、研发、低污染轻工业和休闲娱乐等功能。

产业转型计划：1985 年，新加坡提出未来十年制造业和服务业是推动经济增长的两大动力。这表明政府在政策上鼓励产业向技术密集型方向转型，以提高产业的附加值和竞争力。

2. 产业与城市功能融合的特点

注重研发与创新：政府设立国家培训中心并与其他国家联合设立科研机构，推动技术创新和产业升级。这些措施促进了技术密集型产业的发展，同时也为城市功能的完善提供了技术支持。

生产性服务业的协同发展：在发展制造业的同时，生产性服务业也得到协同发展，支持制造业的良好发

[1] 由于市场瞬息万变，规划无法准确预测未来土地市场的发展，因此新加坡市区重建局于 1995 年提出“白地”概念。“白地”允许开发商在不突破建筑总量且满足政府要求的基本配置的情况下，自行决定其余建筑面积的用途。

展。例如，裕廊工业区中裕廊岛南部海岸线规划发展石油化工产业，北部双溪布洛发展木材加工和建筑业，东部紧邻樟宜机场发展航空产业。

产业与城市功能的协同布局：产业区分布在新加坡中心“绿色中心环”的外围，即新加坡西端、北端和东端预留产业集群用地。这种布局使得产业与城市功能能够更好地协同，便于资源的共享和交通的便捷。在镇边缘设置轻工业用地，以实现就近就业、设施共享和缓解交通压力。

通过这些政策和措施，新加坡在技术密集型阶段成功地实现了产业与城市功能的深度融合，为后续的经济发展和城市化奠定了坚实的基础。

三、资本密集型阶段

从 20 世纪 80 年代开始，新加坡整体的经济结构已开始转化为资本密集型，产业结构由传统制造业为主向包含制造业和服务业的高附加值产业进化。工业园区的发展对营造产业的集聚区域与产业空间也愈加明显。

1. 政府政策

产业结构转型升级：推动产业结构向资本密集型和高附加值产业转型。例如，裕廊工业区逐渐对工业的类型有了选择，向更清洁和技术、资本密集型的工业类型发展。

基础设施投资：政府在基础设施方面进行了战略投资，辅助产业的发展，进一步深化了新加坡的经济基础。例如，裕廊工业区预留了足够的空间用于基础设施建设和产业扩张，包括完善的交通网络、供水供电系统、环保设施等

2. 产业与城市功能融合的特点

产业空间的精细化集中发展：在规划的长期性和统一性之下，产业空间布局更加精细化，集中发展专项产业。新型产业用地功能高度混合，可以兼容商务、商业、研发、低污染轻工业和休闲娱乐等功能。

产城一体化的综合性发展：裕廊工业园区在规划上结合了工业生产、商业活动、居住生活、教育和休闲娱乐等多功能，形成了一个综合性的生活和工作环境。这种综合一体化设计有助于提高生活品质，吸引和保留人才，同时也促进了社区和经济的发展。

四、科技密集型阶段

随着中国、南亚新兴市场在 20 世纪 90 年代的崛起，新加坡政府采取的经济策略是向“经济上游”升级，其在工业园区中表现为产业集群和提高土地产业产出率，即加大对研发的重视、产业链的全面发展和最大化利用土地。

1. 政府政策

税收优惠政策：为鼓励企业进行科技创新，新加坡政府提供了一系列税收优惠政策。例如，企业研发支出可以享受部分扣除、额外扣除、加计扣除和研发税收补贴等。这些优惠政策降低了企业的研发成本，激励企业加大研发投入，推动了科技产业的发展。

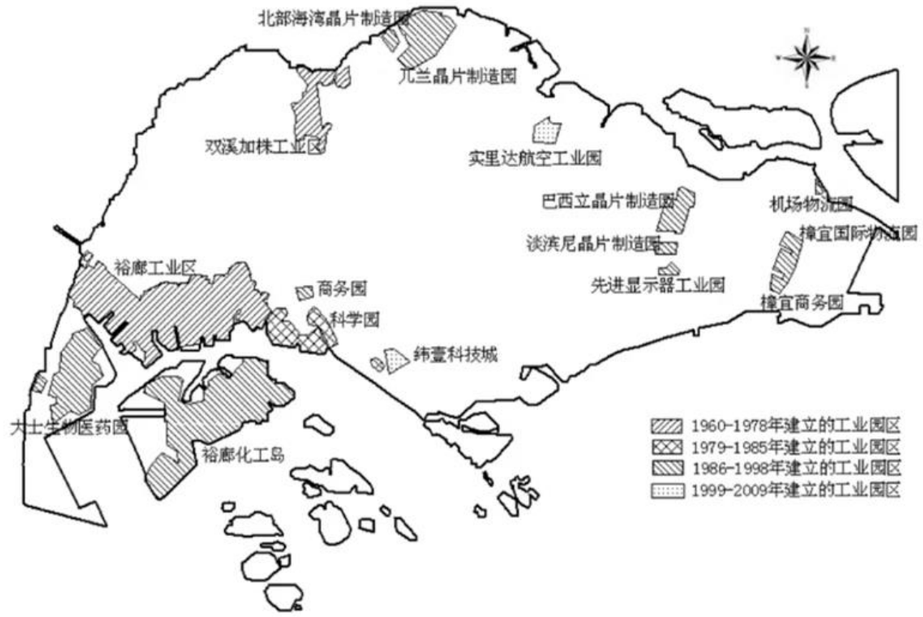
吸引国际科技资源：新加坡政府实行“环球校园”计划，吸引国际知名大学如耶鲁大学、麻省理工学院等在本国设立分校及人才培养中心。这不仅集聚了国际科技资源和创新要素，也为新加坡的科技产业提供了人才支持和智力支撑。

2. 产业与城市功能融合的特点

产城融合理念的深化：新加坡的产业园区发展更加注重产城融合，强调工作、生活、学习、休闲等多功能的混合布局。例如，纬壹科技城（one-north）就是一个集工作、生活、学习、休憩为一体的综合知识型科技园区。这种布局不仅提高了园区的活力和吸引力，也促进了人才的集聚和创新活动的开展。

科技创新与产业发展的紧密结合：新加坡政府推动科技创新与产业发展的紧密结合，鼓励产学研合作。例如，新加坡榜鹅数码园区由政府、企业和大学三方共同策划，旨在创造协同效应，实现产学研的有效互动。新加坡理工大学新校区的实验室和教室可设在商业园区内，而商业园区的企业研发中心和初创企业也可入驻校园，实现空间“交换”。

图 7：新加坡各时期主要工业园区的空间分布



来源：城市观察

从零碳产城融合项目的发展经历来看，新加坡同样经历了多个阶段，每个阶段都有独特的背景、政策支持和技术特点。各阶段都围绕国家经济发展、技术创新和绿色转型的要求逐步推进。通过对产业类型和发展阶段的分析，我们可以看到新加坡在零碳经济领域的全面布局和领先战略。

一、初期探索阶段（2000-2010 年）

1. 背景及政策支持

21 世纪初，为应对土地资源有限和能源进口依赖的问题，新加坡开始重视可持续发展的重要性，尝试建立具有绿色发展理念的城市功能区。2005 年，新加坡建筑与建设局（Building and Construction Authority，简称 BCA）推出了 Green Mark 标准，该标准是新加坡建筑领域的核心认证体系。旨在鼓励建筑物采取可持续性设计、节能技术和绿色建筑材料，推动建筑环境的绿色转型。零碳园区在设计时必须符合这一标准，吸引高端产业与创新型企业，带动区域经济增长。

2. Green Mark 标准的核心理念

能源效率

- 提高建筑物的能量效率：鼓励采用良好的建筑设计方法和节能设备，如高效空调系统、照明系统、机械通风系统等。
- 能源管理系统：要求建筑物安装能源管理系统，以实时监测和优化能源使用。
- 可再生能源利用：鼓励现场能源生产，如太阳能光伏板等，以减少对传统能源的依赖。

水资源管理

- 提高用水效率：采用节水装置和设备，如低流量水龙头和节水型马桶。
- 雨水管理：通过雨水收集和回用系统，有效利用雨水资源。
- 替代水源：鼓励使用替代水源，如再生水等。

环境保护

- 减少环境影响：在设计、施工以及材料和资源选择过程中，注重减小对环境的影响。
- 绿色交通：鼓励绿色交通方式，如提供自行车停车设施和鼓励步行等。
- 环境规划：优化区域内的无障碍设施、公共绿地、微气候等。

室内环境质量

- 提高室内环境质量：包括空气质量、热舒适度、噪声控制以及日光照射等方面。
- 智能技术应用：通过智能技术建立更为系统有效的反馈机制，实现精准的室内环境控制。

绿色建筑与施工

- 可持续设计策略：优化建筑形体和朝向，采用被动式设计策略以提高能源效率。
- 可持续建造：推广装配式建筑和绿色施工方法，减少建筑施工过程中的资源消耗和废弃物产生。

社区参与与创新

- 社区参与：鼓励相关者的参与、反馈和评估，提高公众对绿色建筑的认知和参与度。
- 创新与特色：鼓励创新技术和手段，对环境产生有利影响，并在绿色建筑实践中形成独特的特色。

这些内容共同构成了新加坡 Green Mark 标准的核心要素，旨在推动建筑物在全寿命周期内的环境友好和可持续发展，降低对环境的影响，提高建筑的能源效率和室内环境质量。

3. 新加坡绿色建筑基金

新加坡绿色建筑基金（Green Building Fund，简称 GBF）由新加坡建筑与建设局（BCA）管理，旨在推动绿色建筑项目的融资支持，帮助零碳园区和其他绿色建筑项目获得所需资金。

- 绿色建筑项目资助：为符合绿色建筑标准的项目提供财政补贴，降低开发成本。
- 节能建筑改造：提供资金支持，帮助老旧建筑进行节能改造，达到低碳排放标准。
- 绿色园区发展：鼓励开发商在园区内实施绿色建筑和低碳能源技术，并通过绿色基金提供支持。

4. 典型案例

One-North 园区于 2001 年启动开发，聚焦生物医药、信息通信和媒体等知识密集型行业。One-North 园区总占地约 200 公顷，分为多个功能子区，包括 Biopolis（生物医药区）、Fusionopolis（信息与媒体科技区）和 Mediapolis（数字媒体区），容纳超过 400 家公司和约 46,000 名员工。吸引了全球顶尖生物科技公司和研究机构，如辉瑞、葛兰素史克，成为亚太地区生物科技研发的核心枢纽。

园区中 Nexus Building 由 JTC Corporation 建设，项目于 2008 年启动，2010 年完工。建筑用途主要为生物医药研发的实验室和办公空间，该项目在绿色建筑技术主要包括以下几个方面。

双层幕墙系统

Nexus Building 的外立面采用了双层幕墙设计，使用低辐射玻璃（Low-E Glass），具有高效隔热和防紫外线功能，可以减少室内热量积累。其中两层玻璃之间形成一个空气缓冲区。缓冲区内的空气层会在白天吸收一部分热量，通过顶部的通风口释放热空气，从而降低室内温度。这种设计不仅提供隔热效果，还促进自然通风，减少建筑内部冷却需求。通过使用该技术，不仅使室内温度降低了 2-3°C，减少空调系统的负担，而且提高了室内自然采光利用率，减少了人工照明需求。

高效节能空调系统

该系统实施了结合冰蓄冷技术的高效技术。冰蓄冷技术通过夜间的低电价时段生产冰块，白天高峰用电时融冰供冷，从而显著减少能源成本。在建筑地下室安装大容量的冰蓄冷储罐，并通过智能化控制系统调节冰块的制作与融化时间。融冰产生的冷却水通过循环管网输送至大楼各区域的空调系统，实现降温效果。通过智能调控与建筑能源管理系统（BMS）集成，动态监测冷却需求，避免过度制冷和能源浪费。该系统采用的冰蓄冷技术帮助减少约 15%的高峰用电负担，整体空调系统能效比（COP）提高 20%。

智能能源管理系统（BEMS）

Nexus Building 配备了先进的建筑能源管理系统（BEMS），该系统能够对建筑的能源使用进行实时监控和优化。通过能源监测模块，分区安装传感器，监测实验室、办公区和公共区域的实时能耗。监测模块具备自适应调节功能，根据人员流动、时间段和环境条件动态调整空调、照明和电梯的运行状态，并通过数据分析预测能源使用模式，并提供建议以优化设备运行。在使用量较低的时段，自动关闭或减少不必要的设备运行，实现了能源资源的高效利用。该技术使用实现了整体建筑能耗的 20%下降。

水资源管理系统

采用了雨水收集与回用系统，用于非饮用用途如景观灌溉、卫生间冲洗和冷却塔补水。使用雨水收集设施在建筑屋顶和周边区域布置雨水收集沟渠，将雨水汇集至地下储水罐。通过水质处理系统过滤和消毒工艺确保收集到的雨水符合非饮用水标准。采用分流供水管网设置独立的管道系统，将处理后的雨水输送至园区绿化和冷却系统。该建筑非饮用水需求中，超过 20%由雨水系统满足。每年节省超过 20,000 立方米的新鲜用水。

二、快速扩展阶段（2011-2020 年）

1. 背景及政策支持

全球对低碳经济的需求逐渐增加，新加坡寻求在绿色经济领域建立国际领先地位，提出“智慧国 2025”战略，将绿色城市与智能化技术结合。新加坡能源管理局（EMA）发布了关于能源转型的政策（Energy Transformation Policy），特别强调通过提高能源效率和发展可再生能源来实现零碳目标。该政策支持发展绿色能源基础设施，并推动零碳园区中能源自给自足的建设。

新加坡政府于 2015 年提出《新加坡绿色建筑总蓝图 2015》（Sustainable Singapore Blueprint 2015），提出明确的可持续发展目标。同时国家研究基金（NRF）也寻求资助相应零碳技术研发和试点项目。

2. 《新加坡绿色建筑总蓝图 2015》的主要可持续目标

可持续土地规划原则

- 高效城市发展：采用创新理念改善居住环境和优化土地利用。
- 公共交通导向：通过提供广泛的铁路网络和在车站周围加强土地利用，促进公共交通的使用。
- 分散商业中心：将商业中心分散化，提供更多就业机会，减少通勤需求和高峰时段交通拥堵。
- 优质居住环境：在每个新镇提供多种住房选择和完善的配套设施。
- 保护自然和建筑遗产：保护自然保护区和自然区域，谨慎保护具有杰出建筑和历史价值的建筑。
- 社区精神培养：通过提供公共空间和促进积极的公民参与可持续发展，培养社区精神。

“生态智能”宜居城镇

- 智能科技与生态友好功能：将智能科技和生态友好功能融入城镇和家庭，使新加坡人享受更大的便利和更好的生活质量。
- 绿色生活方式：通过多种方式让人们在家中节能节水，以及通过双通道系统方便居民分类回收可回收物。

“少车”新加坡

- 公共交通优先：通过更密集的铁路网络和广泛的公交服务，实现无缝、高效的出行。
- 鼓励步行和骑行：开展自行车和步行环境的创新功能和创意设计，发展覆盖超过 700 公里的综合自行车网络。
- 减少汽车使用：园区内打造“弱汽车化”出行方式，为人们提供更多的交通选择，实现园区内的轻松出行和便利通勤。引入无人驾驶汽车，并试点电动汽车共享计划。

目标是，到 2030 年，公共交通在高峰时段的出行比例从 2013 年的 64%提高到 75%。

零废物国家

- 减少消费、再利用和回收：通过政府、社区和企业的共同努力，建立基础设施和项目，使“零废物”成为我们的生活方式。
- 清洁和健康的环境：保持新加坡的清洁和健康，节约宝贵资源，并为未来几代释放原本用于垃圾填埋的土地。

领先的绿色经济

- 绿色实践：鼓励企业采用更绿色的做法，使新加坡成为可持续发展尖端业务的中心。
- 绿色创新：创建生活实验室来测试改善生活和有利于环境的想法。

目标是，到 2030 年，80%的建筑达到 BCA Green Mark 标准。

积极和有礼的社区

- 环境的模范管理者：新加坡人必须成为环境的模范管理者，参与塑造社区和建设更和谐的社会。
- 共同空间和环境的关爱：企业和政府应共同关爱共同空间和环境，从长远角度节约宝贵资源，并倡导可持续的生活方式。

这些目标和措施共同构成了《新加坡绿色建筑总蓝图 2015》的核心内容，旨在推动新加坡成为一个更加宜居和可持续发展的城市。

3. 典型项目

占地约 360 公顷的 Jurong Lake District（裕廊湖区），计划成为新加坡的第二中央商务区，包括商业区、居住区和休闲娱乐设施。其中，Ng Teng Fong General Hospital (NTFGH)医院由新加坡卫生部（Ministry of Health）于 2015 年开发建成，由 CPG Consultants 和 HOK Architects 联合设计，是新加坡首个获得 Green Mark Platinum 认证的医院项目，也是全球范围内以可持续发展为核心的医疗建筑典范。该项目将医疗服务与可持续发展理念结合，提供舒适健康的医疗环境，同时显著降低碳足迹和能源消耗。

被动式设计策略

被动式设计策略贯穿整个建筑设计，最大限度地减少对人工能源的依赖。

- 自然通风病房：80%的病房通过设计实现自然通风，利用建筑形状和布局引导外部气流进入公共区域，如中庭和走廊，降低通风设备的使用频率，并大大降低空调使用需求。病房布局设计为“单廊形式”，每个病房都能享受交叉通风效果。
- 建筑方向和遮阳设计：建筑主要朝向南北，避免东西向阳光直射，同时使用水平遮阳板和垂直遮阳板减少热辐射。
- 高窗与采光井：在公共区域布置了高窗和采光井，通过自然光照明减少日间电力需求。
- 反射涂层材料：建筑外墙采用高反射率的涂层材料，减少太阳辐射热量的传导。

成效方面，这些做法让建筑外墙热增量减少了 35%，空调能耗降低 50%，自然采光覆盖率达 70%，显著减少日间照明等电力能源需求。

绿色屋顶与雨水管理系统

屋顶绿化结合雨水管理系统，提升建筑生态性能，优化水资源使用。

- 屋顶绿化：采用本地耐热植物覆盖建筑屋顶，形成天然隔热层，降低室内冷却需求。
- 雨水收集与利用：在屋顶和地下室安装雨水收集系统，将雨水储存后用于绿化灌溉和冷却塔循环使用。
- 低影响开发（LID）策略：在建筑周围采用多孔铺装和植被过滤带，减少雨水径流并过滤污染物。

成效方面，这些做法让年用水量减少 35%，约节省 57,000 立方米的水资源。绿化面积占总建筑面积的 32%，改善了城市微气候。

垂直绿化与生物多样性提升

- 垂直绿墙：在建筑外立面和庭院引入垂直绿化和多样化植物景观，提升环境美观性和生态价值。医院外墙覆盖大量本地植物，改善空气质量并降低建筑表面温度。
- 生态景观设计：庭院和公共空间种植多样化植物，吸引本地鸟类和昆虫栖息，恢复生态平衡。
- 降噪植物带：通过绿化隔离层降低周边交通噪声对医院环境的影响。

成效方面，这些做法增加了 30%的绿色覆盖率，增强了生物多样性。附近地区平均降噪幅度达 5 分贝。

智能废物管理系统

- 通过先进的废物分类与处理系统，实现医疗废弃物的高效管理。
- 真空垃圾输送系统：垃圾通过地下管道自动输送到集中处理区域，避免垃圾转运造成的二次污染。
- 医疗废弃物高温处理技术：对医疗废弃物进行高温消毒和分解，确保无害化处理。
- 废物回收与再利用：针对普通垃圾分类收集，提升废物回收率。

成效方面，这些做法让医疗废弃物处理效率提高 40%。固体废弃物回收率达 60%。

技术成就与社会影响

- 资源效率提升：水资源使用效率提升 35%。
- 能源使用效率提升 38%，建筑能效位列全球医疗建筑前列。
- 健康与舒适度改善：通过自然通风和采光设计，住院患者的舒适感和康复速度均显著提高。
- 碳排放减量：每年减少碳排放约 8,000 吨，相当于种植 40,000 棵树。

通过一系列的可持续发展方案，园区内建筑能源消耗减少了约 25%，碳排放减少 40%以上，获得“智慧城市大奖”全球提名，成为新加坡智慧城市标杆。

三、转型与提升阶段（2021-2030 年）

1. 背景及政策支持

随着全球气候变化加剧，绿色经济加速转型日趋迫切，2021 年 2 月 10 日，新加坡环境与水务部（Ministry of Sustainability and the Environment）发布了《新加坡绿色计划 2030》发布，该计划旨在制定未来十年的可持续发展目标，包括绿色建筑、清洁能源使用、低碳交通等多个方面。推动新加坡向更具可持续性的未来转型，目标是在 2030 年之前使新加坡成为全球领先的绿色城市。

2. 《新加坡绿色计划 2030》的主要内容

大自然中的城市

- 城市绿化：到 2030 年，新加坡将多种植 100 万棵树，使每户家庭步行 10 分钟即可到达公园。
- 绿色空间增加：到 2035 年底前，新加坡将增加 1000 公顷的绿色空间。
- 绿色联道建设：构筑 18 公里长的东海岸-巴西立和 34 公里长的兀兰-市中心两个南北绿色联道，以及 25 公里长的卡迪蒙苏-双溪布洛和 62 公里长的樟宜海滩-大士两个东西绿色联道。

可持续生活

- 交通方式转变：到 2030 年，75%的高峰时段通勤方式将变为公共交通。
- 自行车道扩展：自行车道将增加两倍多至 1320 公里。
- 垃圾减量：每人每天的平均垃圾填埋量将减少 30%。
- 学校碳排放减少：学校的净碳排放量将减少三分之二。

能源重置

- 新能源汽车推广：到 2030 年，在新加坡注册的新车必须是节能车型。
- 充电基础设施建设：建设多达 6 万个电动汽车充电点。

绿色经济

- 企业支持：设立“企业可持续发展计划”（Enterprise Sustainability Programme），帮助本地企业提升可持续发展能力。
- 绿色建筑标准提升：推出新的绿色建筑总蓝图，提高建筑绿色标准。

具韧性未来

- 气候适应措施：全岛将装置气候感应器，收集数据以了解城市热岛效应，并采取减缓措施。
- 海岸线保护：从 2021 年起，探讨包括海堤与土堤的建设，预计在 2030 年完成计划制定，保护裕廊岛以及市区-东海岸的海岸线、西北海岸线等高危区。

这些目标和措施构成了新加坡绿色计划 2030 的核心内容，旨在推动新加实现更加可持续和环保的发展。

3. 清洁能源与脱碳

为了达成《新加坡绿色计划 2030》，新加坡在清洁能源与脱碳技术领域加大研发力度，取得了显著进展，特别是在氢能、碳捕集与封存、太阳能和生物质能等方面。这些技术的研发和应用不仅推动了新加坡的能源转型，也为全球应对气候变化提供了宝贵经验。未来，新加坡将继续加大研发投入，力争在 2030 年实现其清洁能源和脱碳目标。

氢能技术

新加坡正在大力发展氢能技术，通过电解水生产绿色氢气，并探索氢气在发电、工业和交通领域的应用。2022 年，新加坡启动了首个绿色氢气生产试点项目，利用太阳能电解水成功生产氢气。此外，裕廊岛的氢气发电试点设施于 2023 年投入运行，发电效率超过 60%。新加坡还与澳大利亚、日本等国合作，研究氢气进口和储存技术，目标是到 2030 年使氢能占全国能源结构的 50%。

碳捕集、利用与封存（CCUS）

新加坡在裕廊岛工业区开展碳捕集、利用与封存（CCUS）试点项目，利用化学吸收法和物理吸附法捕集工业排放的二氧化碳。捕集的二氧化碳被用于生产甲醇和建筑材料，部分则被封存于海底地质层。2021 年，新加坡成功捕集并封存了约 1 万吨二氧化碳，2023 年利用捕集的二氧化碳生产了首批甲醇产品。新加坡计划到 2030 年将 CCUS 技术推广至主要工业设施，每年减少 200 万吨二氧化碳排放。

太阳能技术

新加坡通过建设浮动太阳能农场和研发高效太阳能电池，大幅提升太阳能利用效率。截至 2023 年，浮动太阳能农场的总装机容量达到 200 兆瓦，可满足约 5 万户家庭的用电需求。同时，新加坡国立大学和南洋理工大学研发的钙钛矿太阳能电池实验室效率已超过 25%，接近商业化应用。新加坡的目标是到 2030 年将太阳能装机容量提升至 2 吉瓦，占全国电力需求的 4%。

生物质能与地热能

新加坡利用生物质能发电，在裕廊岛建设了生物质发电厂，使用棕榈壳等生物质材料，装机容量达 50 兆瓦，每年减少 10 万吨二氧化碳排放。地热能技术目前处于勘探阶段，新加坡北部正在进行地热资源评估，未来有望实现商业化应用。这些技术为新加坡的清洁能源转型提供了多样化选择，助力其实现 2030 年可持续发展目标。

四、全球示范阶段（2031 年及未来）

新加坡致力于成为全球绿色城市和低碳经济的标杆，推出国际绿色城市影响力的专项政策。开始向国际输出绿色城市和园区解决方案。

- 重点关注零碳技术的全球推广和应用。
- 深化国际合作，例如“一带一路”绿色发展倡议的参与。
- 吸引全球零碳经济相关企业和人才。
- 推进智慧能源城市的全面实现。
- 探索全行业、全社会的碳中和解决方案。



第三章 产城融合项目与可持续发展

第一节 产城融合项目的相关政策

建设产城融合项目是一项复杂的系统工程，需要从规划、产业发展、城市建设、公共服务等多个方面协同推进，并配套相应的政策支持。我国低碳化园区转型始于 2007 年，历经国家生态工业示范园区、循环化改造园区、UNIDO（联合国工业发展组织） 绿色工业园区、低碳工业园区、绿色园区、碳排放评价试点产业园区等重要阶段。截至 2020 年 11 月，国内已成功验收国家生态工业示范园区 48 家、园区循环化改造示范试点 44 家、国家级绿色工业园区 171 家 。2021 年 10 月，国务院发布《2030 年前碳达峰行动方案的通知》，明确提出打造 100 个城市园区试点，为低碳园区建设注入强大动力。

为推动零碳产城融合项目的建设，国家多部委纷纷出台指导性政策，从评价标准、工作方向、能耗指标、技术路线到金融工具等多个维度，为园区的建设发展指明方向。

表 1：零碳产城融合项目的主要政策

发布日期	发布单位	政策名称	相关内容阐述
2021 年 7 月 1 日	国家发改委	《“十四五” 循环经济发展规划》	在五大重点工程中，着重强调园区循环化发展，并明确提出相关资源综合利用的量化指标，为园区资源高效利用提供方向。
2021 年 2 月 22 日	国务院	《关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见》	科学编制新建产业园区开发建设规划，依法依规开展规划环境影响评价；推进既有产业园区和产业集群循环化改造。
2022 年 7 月 7 日	工信部、发改委、生态环境部	《工业领域碳达峰实施方案》	建成一批绿色工厂和绿色工业园区，研发、示范、推广一批减排效果显著的低碳零碳负碳技术工艺装备产品。
2021 年 12 月 28 日	国务院	《“十四五” 节能减排综合工作方案》	引导工业企业向园区集聚，推动工业园区能源系统整体优化和污染综合整治，鼓励工业企业、园区优先利用可再生能源。 到 2025 年，建成一批节能环保示范园区。
2021 年 12 月 15 日	发改委、工信部	《关于做好“十四五”园区循环化改造工作有关事项的通知》	到 2025 年底，具备条件的省级以上园区，全部实施循环化改造，显著提升园区绿色低碳循环发展水平。
2021 年 11 月 5 日	工信部、人民银行、银保监会、证监会	《关于加强产融合作推动工业绿色发展的指导意见》	鼓励运用数字技术开展碳核算，率先对绿色工业园区等进行核算；支持在绿色低碳园区推动基础设施领域不动产投资信托基金（基础设施 REITs）试点；鼓励建设中外合作绿色工业园区，推动绿色技术创新成果在国内转化落地。
2021 年 10 月 28 日	生态环境部	《关于在产业园区规划环评中开展碳排放评价试点的通知》	探索在产业园区规划环评中开展碳排放评价的技术方法和工作路径，推动形成将气候变化因素纳入环境管理的机制，助力区域产业绿色转型和高质量发展。
2024 年 9 月 21 日	绿会标准委	《零碳园区建设与评价技术规范》	从总体规划、能源系统、建筑选址、生产系统、交通物流系统、基础设施系统、管理体系、生物多样性友好系统、碳抵消方面提出了具体的操作要求，并且给出了明确的评价标准和低碳、近零碳、零碳三个等级。
2024 年 12 月 12 日	中央经济工作会议		会议强调要协同推进降碳减污扩绿增长，加紧经济社会发展全面绿色转型，建立一批零碳园区，推动全国碳市场建设，建立产品碳足迹管理体系、碳标识认证制度。

一、《“十四五” 循环经济发展规划》

2021 年 7 月 1 日，发改委发布了《“十四五” 循环经济发展规划》，并于发布之日起实施。

1. **整体目标：**到 2025 年，全面推行循环型生产方式，广泛推广绿色设计和清洁生产，显著提升资源综合利用能力，基本建立资源循环型产业体系。进一步完善废旧物资回收网络，提升再生资源循环利用能力，构建起覆盖全社会的资源循环利用体系。

2. **三大主要任务**

- **构建资源循环型产业体系：**积极推行重点产品绿色设计，引导企业在生产过程中优先选用无毒无害、低毒低害的环境友好型原料；强化重点行业清洁生产，依法在 “双超双有高耗能” 行业实施强制性清洁生产审核，并鼓励其他行业主动开展审核；大力推进园区循环化发展，加强资源综合利用，积极推动城市废弃物协同处置。

- **构建废旧物资循环利用体系：**不断完善废旧物资回收网络，积极推广 “互联网 + 回收” 模式，实现线上线下协同发展；提升再生资源加工利用水平，推动再制造产业高质量发展；规范二手商品市场发展，完善二手商品流通法规，建立健全车辆、家电、手机等二手商品的鉴定、评估、分级标准，规范交易秩序和行为，鼓励发展 “互联网 + 二手” 模式。

- **深化农业循环经济发展：**加强农作物秸秆、畜禽粪污、林业废弃物、农产品加工副作用等农林废弃物的资源化利用；引导农民合作社等各个责任主体主动参与回收；推行种养结合、农牧结合、养殖场与农田建设有机结合的循环型农业发展模式。

3. **五大重点工程：**城市废旧物资循环利用体系建设、园区循环化发展、大宗固废综合利用示范、建筑垃圾资源化利用示范、循环经济关键技术与装备创新。其中，园区循环化发展作为重点工程之一，得到特别关注。

4. **六大重点行动：**再制造产业高质量发展、废弃电器电子产品回收利用、汽车使用全生命周期管理、塑料污染全链条治理、快递包装绿色转型、废旧动力电池循环利用。

同时，该规划还制定了主要资源产出率以及相关资源综合利用率等方面的具体量化指标，为循环经济发展提供了明确的考核依据。

二、《关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见》

2021 年 2 月 22 日，国务院发布《关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见》，并于发布之日起实施。

1. **主要目标：**全方位全过程推行绿色规划、绿色设计、绿色投资、绿色建设、绿色生产、绿色流通、绿色生活、绿色消费，确保实现碳达峰、碳中和目标，推动我国绿色发展迈上新台阶。到 2025 年，绿色低碳循环发展的生产体系、流通体系、消费体系初步形成；到 2035 年，美丽中国建设目标基本实现。

2. **健全绿色低碳循环发展的生产体系：**推动工业绿色升级，加强工业生产过程中的危险废弃物管理；加快农业绿色发展，推进农业与旅游、教育等产业深度融合。提高服务业绿色发展水平，建立一批国家绿色产业示范基地。

3. **健全绿色低碳循环发展的流通体系：**打造绿色物流，推广绿色低碳运输工具，支持物流企业构建数字化运营平台；加强再生资源回收利用，推进垃圾分类回收与再生资源回收 “两网融合”，鼓励地方建立再生资源区域交易中心；建立绿色贸易体系，深化绿色 “一带一路” 合作，拓宽节能环保、清洁能源等领域技术装备和服务合作。

4. **健全绿色低碳循环发展的消费体系：**促进绿色产品消费，加强对企业和居民采购绿色产品的引导，加强绿色产品和服务认证管理；倡导绿色低碳生活方式，推进生活垃圾分类和减量化、资源化，引导绿色出行，开展绿色生活创建活动。

5. **加快基础设施绿色升级：**推动能源体系绿色低碳转型，提升可再生能源利用比例，加快大容量储能技术研发推广，提升电网汇集和外送能力

6. **其他重要内容：** 科学编制新建产业园区开发建设规划，依法依规开展规划环境影响评价，严格准入标准，完善循环产业链条，推动形成产业循环耦合。推进既有产业园区和产业集群循环化改造，推动公共设施共建共享、能源梯级利用、资源循环利用和污染物集中安全处置等。

三、《工业领域碳达峰实施方案》

2022 年 7 月 7 日，工业和信息化部、国家发展改革委、生态环境部联合发布《工业领域碳达峰实施方案》，并于发布后实施。旨在推动工业领域绿色低碳转型，助力实现碳达峰目标,方案指出：

1. **总体目标：**“十四五” 期间，产业结构与用能结构优化取得积极进展，能源资源利用效率大幅提升，建成一批绿色工厂和绿色工业园区，研发、示范、推广一批减排效果显著的低碳零碳负碳技术工艺装备产品，筑牢工业领域碳达峰基础。到 2025 年，规模以上工业单位增加值能耗较 2020 年下降 13.5%，单位工业增加值二氧化碳排放下降幅度大于全社会下降幅度，重点行业二氧化碳排放强度明显下降。“十五五” 期间，产业结构布局进一步优化，工业能耗强度、二氧化碳排放强度持续下降，努力达峰削峰，在实现工业领域碳达峰的基础上强化碳中和能力，基本建立以高效、绿色、循环、低碳为重要特征的现代工业体系，确保工业领域二氧化碳排放在 2030 年前达峰。

2. **重点任务**

- 调整产业结构：推动产业结构优化升级，坚决遏制高耗能高排放低水平项目盲目发展，大力发展绿色低碳产业；构建有利于碳减排的产业布局；优化重点行业产能规模；推动产业低碳协同示范。

- 深入推进节能降碳：调整优化用能结构，重点控制化石能源消费，有序推进钢铁、建材等行业煤炭减量替代，稳妥有序发展现代煤化工，推进氢能制储输运销用全链条发展等；推动工业用能电气化，在铸造、玻璃等重点行业推广电锅炉等技术，开展电能替代，加强电力需求侧管理；加快工业绿色微电网建设，增强源网荷储协调互动，推进多能高效互补利用，加快新型储能规模化应用；加快实施节能降碳改造升级。

四、国务院印发《“十四五” 节能减排综合工作方案》

2021 年 12 月 28 日，国务院印发《“十四五” 节能减排综合工作方案》。

1. 引导工业企业向园区集聚，推动工业园区能源系统整体优化和污染综合整治，鼓励工业企业、园区优先利用可再生能源。

2. 以省级以上工业园区为重点，推进供热、供电、污水处理、中水回用等公共基础设施共建共享，对进水浓度异常的污水处理厂开展片区管网系统化整治，加强一般固体废物、危险废物集中贮存和处置，推动挥发性有机物、电镀废水及特征污染物集中治理等“绿岛”项目建设。

3. 到 2025 年，建成一批节能环保示范园区。

五、《关于做好“十四五”园区循环化改造工作有关事项的通知》

2021 年 12 月 15 日，发改委、工信部印发《关于做好“十四五”园区循环化改造工作有关事项的通知》明确了园区的建设方向。

1. **工作目标：**到 2025 年底，具备条件的省级以上园区（包括经济技术开发区、高新技术产业开发区、出口加工区等各类产业园区）全部实施循环化改造，显著提升园区绿色低碳循环发展水平。通过循环化改造，实现园区的能源、水、土地等资源利用效率大幅提升，二氧化碳、固体废物、废水、主要大气污染物排放量大幅降低。

2. **优化产业空间布局：**根据物质流和产业关联性，优化园区内的企业、产业和基础设施的空间布局，体现产业集聚和循环链接效应，积极推广集中供气供热供水，实现土地的节约集约高效利用。

3. **促进产业循环链接：**按照 “横向耦合、纵向延伸、循环链接” 原则，建设和引进关键项目，合理延伸产业链，推动产业循环式组合、企业循环式生产，促进项目间、企业间、产业间物料闭路循环、物尽其用，切实提高资源产出率。

4. **推动节能降碳：**开展节能降碳改造，推动企业产品结构、生产工艺、技术装备优化升级，推进能源梯级利用和余热余压回收利用。因地制宜发展利用可再生能源，开展清洁能源替代改造，提高清洁能源消费占比。提高能源利用管理水平。

5. **推进资源高效利用、综合利用：**园区重点企业全面推行清洁生产，促进原材料和废弃物源头减量。加强资源深度加工、伴生产品加工利用、副产物综合利用，推动产业废弃物回收及资源化利用。加强水资源高效利用、循环利用，推进中水回用和废水资源化利用。因地制宜开展海水淡化等非常规水利用。

6. **加强污染集中治理：**加强废水、废气、废渣等污染物集中治理设施建设及升级改造，实行污染治理的专业化、集中化和产业化。强化园区的环境综合管理，构建园区、企业和产品等不同层次的环境治理和管理体系，最大限度地降低污染物排放。

六、《关于加强产融合作推动工业绿色发展的指导意见》

2021 年 11 月 5 日，工业和信息化部、人民银行、银保监会、证监会联合发布《关于加强产融合作推动工业绿色发展的指导意见》。

1. **总体目标：**到 2025 年，推动工业绿色发展的产融合作机制基本成熟，符合工业特色和需求的绿色金融标准体系更加完善，工业企业绿色信息披露机制更加健全，产融合作平台服务进一步优化，支持工业绿色发展的金融产品和服务更加丰富，各类要素资源向绿色低碳领域不断聚集，力争金融重点支持的工业企业成为碳减排标杆，有力支撑实现碳达峰、碳中和目标。

2. **主要任务：**鼓励运用数字技术开展碳核算，率先对绿色工业园区等进行核算；支持在绿色低碳园区推动基础设施领域不动产投资信托基金（基础设施 REITs）试点；鼓励建设中外合作绿色工业园区，推动绿色技术创新成果在国内转化落地。

七、《关于在产业园区规划环评中开展碳排放评价试点的通知》

2021 年 10 月 28 日，由生态环境部办公厅发布《关于在产业园区规划环评中开展碳排放评价试点的通知》。

1. **主要目标：**按照《规划环境影响评价技术导则 产业园区》，探索在产业园区规划环评中开展碳排放评价的技术方法和工作路径，推动形成将气候变化因素纳入环境管理的机制，助力区域产业绿色转型和高质量发展。通过试点工作形成一批可复制、可推广的案例经验，为碳排放评价纳入环评体系提供工作基础

2. **试点对象：**具备碳排放评价工作基础的国家级和省级产业园区，优先选择涉及碳排放重点行业或正在开展规划环评工作的产业园区

3. **工作任务：**以生态环境质量改善为核心，采取定性与定量相结合的方式，探索开展不同行业、区域尺度上碳排放评价的技术方法，包括碳排放现状核算方法研究、碳排放评价指标体系构建、碳排放源识别与监控方法、低碳排放与污染物排放协同控制方法等方面。通过试点工作，重点从碳排放评价技术方法、减污降碳协同治理、考虑气候变化因素的规划优化调整方式和环境管理机制等方面总结经验，形成一批可复制、可推广的案例，为碳排放评价纳入环评体系提供工作基础。

八、《零碳园区建设与评价技术规范》

2024 年 9 月 21 日中国生物多样性保护与绿色发展基金会标准工作委员会（简称“绿会标准委”）联合中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所等单位制定的团体标准《零碳园区建设与评价技术规范》（T/CGDF 00046-2024），该规范从总体规划、能源系统、建筑选址、生产系统、交通物流系统、基础设施系统、管理体系、生物多样性友好系统、碳抵消方面提出了具体的操作要求，并且给出了明确的评价标准和低碳、近零碳、零碳三个等级。

1. 规划与设计指标

- 零碳规划目标：园区制定的明确的零碳发展目标和实施路径。
- 土地利用效率：园区土地的合理利用程度，包括建筑密度、容积率等。

2. 能源系统指标

- 可再生能源自给率：园区内可再生能源的产量与园区能源消费量的比值。
- 能源利用效率提升率：与基准年相比，园区能源利用效率的提高比例。
- 分布式能源应用比例：园区内分布式能源（如太阳能、风能、生物质能等）的装机容量或发电量占总能源装机容量或发电量的比例。

3. 建筑与基础设施指标

- 绿色建筑比例：园区内符合绿色建筑标准的建筑面积占总建筑面积的比例。
- 节能建筑比例：园区内采取节能措施的建筑面积占总建筑面积的比例。
- 基础设施节能化水平：园区内道路、照明、给排水等基础设施的节能情况。

4. 产业与经济指标

- 低碳产业占比：园区内低碳产业的产值占园区总产值的比例。
- 单位产值碳排放量：园区内每单位产值所产生的二氧化碳排放量。
- 经济增长与碳排放脱钩指数：反映园区经济增长与碳排放之间的关系，指数越高表明脱钩程度越好。

5. 交通与物流指标

- 绿色交通出行比例：园区内步行、自行车、公共交通等绿色交通方式的出行人次占总出行人次的比例。
- 物流运输低碳化水平：园区内物流运输过程中采用低碳运输方式（如电动车辆、氢能车辆等）的比例。

九、中央经济工作会议

2024 年 12 月 12 日，中央经济工作会议在北京举行，会议强调要协同推进降碳减污扩绿增长，加紧经济社会发展全面绿色转型，建立一批零碳园区，推动全国碳市场建设，建立产品碳足迹管理体系、碳标识认证制度。

除了国家层面支持政策的大面积出台，各地方政府也出台了针对符合本底实际情况的零碳园区政策，在各级政府的重视和支持下，相信我国能从源头上减少温室气体排放，有助于缓解温室效应，降低极端气候事件发生的频率和强度，保护生态系统的平衡与稳定。

第二节 产城融合项目的核心议题

产城融合项目作为经济发展和城市建设的重要载体，其零碳发展模式对于推动区域可持续发展、降低碳排放具有至关重要的意义。这种园区的建设不仅仅是技术层面的革新，更是涉及到经济、社会、环境等多个领域的系统性变革。因此，零碳产城融合项目发展的核心议题涉及能源、产业、建筑、交通、管理等多个维度的系统性变革，需要政府、企业和社会各方的共同努力。

一、能源体系重构与清洁化转型

构建以可再生能源（太阳能、风能、水能等）为主体的能源供应体系，通过分布式能源、储能技术和智能电网实现能源高效利用。打破传统能源供应体系中化石能源的主导地位，重构清洁、可持续的能源体系转型迫在眉睫。相较于传统能源体系中占据绝对主导地位的集中式能源，分布式能源可以将能源生产和消费更加贴近，减少传输损耗，提高能源利用效率。储能技术可以在很大程度上解决可再生能源间歇性的问题，配合智能电网则能够实现能源的精准调配和优化管理，确保新型能源系统的安全稳定运行，进一步提高能源利用效率。

【案例】鄂尔多斯零碳产业园

鄂尔多斯作为我国重要的能源基地，长期以来以煤炭等化石能源的开采和利用为主。在推进碳达峰、碳中和背景下，鄂尔多斯积极探索零碳产业园的建设。将绿色资源优势转变为新能源产业优势，探索了资源型城市转型升级高质量发展的新路子，为资源型地区可持续发展提供了可借鉴的路径。园区 80%的能源来自风电、光伏和储能系统，剩余 20%通过绿电交易购买其他地区的绿色电力来进行补充，实现了 100%清洁电力覆盖。园区采用微电网技术整合风光氢储多种能源形式，形成能源生产与消纳的闭环，通过能源数智化管理系统将能源生产、存储和消费有机结合，大大提高了能源利用效率，减少碳排放。

【案例】青岛中德生态园

青岛中德生态园是中德两国在可持续发展领域合作的典范。该园区布局分布式光伏（16 兆瓦装机）、地热能等为园区提供了清洁的电力和热力供应，并构建泛能网系统（将不同品质的能源用于不同的需求）以实现能源的梯级利用。通过这种高效、清洁的能源供应体系，园区满足了近 100 万平方米建筑面积的供能需求。

【案例】苏州工业园区

苏州工业园区构建了集中供热、供电、供冷的能源供应体系。由专门的能源公司建设和运营热电联产项目，利用发电过程中的余热进行供热和制冷，通过管道将蒸汽、热水等能源输送到园区内的企业和建筑。这种集中供能方式不仅提高了能源利用效率，相比企业各自建设能源设施，还大幅降低了能源生产成本和污染物排放。

二、产业低碳化与循环经济升级

推动传统产业绿色转型，培育零碳产业链，建立资源循环利用体系。 传统产业在经济发展中占据着重要地位，但同时也是碳排放的大户。推动传统产业的绿色转型，不仅可以降低碳排放，还可以提高产业的竞争力和可持续发展能力。与此同时，在产业中长期顶层规划中要加速培育零碳产业链，将传统产业的相关企业打造为零碳产业链的一环，即通过将产业链上下游各个环节的碳排放降至最低，通过产业链协同实现碳中和目标。除碳排放指标外，产业链协同发展还有助于提高资源利用效率。通过生产、消费、回收和再利用等环节的大数据管理与分析，建立和优化资源循环利用体系，减少资源的浪费，实现经济发展与环境保护的双赢。

【案例】万纬物流上海临港园区

万纬物流上海临港园区在仓储物流领域率先实现了运营阶段的零碳排。该园区通过绿色仓储设计，如热氟融霜技术和光伏屋顶，降低了能源消耗。热氟融霜技术可以提高制冷系统的效率，减少能源浪费；光伏屋顶则可以将太阳能转化为电能，为园区提供清洁的能源。此外，园区还积极推广循环托盘的使用，减少了一次性包装材料的使用，降低了资源消耗和环境污染。通过这些措施，园区获得了德国莱茵 TÜV 净零碳认证，这是对其在低碳发展方面的高度认可。

【案例】上海闵行开发区

上海闵行开发区积极推动园区内企业向绿色工厂转型。西门子作为园区内的知名企业，推出了无氟零碳高压开关设备，这是在电气设备领域的一项重大创新。无氟零碳高压开关设备不仅可以减少温室气体的排放，还可以提高设备的性能和可靠性。在龙头企业的引领下，园区形成了低碳供应链集群，这种集群效应可以促进技术创新和资源共享，提高整个产业的竞争力和可持续发展能力。

【案例】 衢州绿色产业集聚区

衢州绿色产业集聚区内的企业，围绕主导产业形成了多个循环经济产业链。例如，氟硅产业中，企业之间实现了氟、硅等资源的循环利用。上游企业产生的含氟、硅废弃物，被下游企业作为原料进行再加工，生产出高附加值的产品。同时，在能源利用方面，推行热电联产，为园区企业集中供热供电，提高能源利用效率，减少能源浪费。

园区建设了固废综合利用平台，对园区内企业产生的各类固体废弃物进行集中收集、分类和综合利用。通过技术研发和创新，将工业废渣、废塑料等废弃物转化为新型建筑材料、再生塑料制品等，实现了废弃物的资源化利用，降低了园区的固废排放量。

园区注重生态环境建设，通过植树造林、建设生态绿地等方式，增加园区的绿色空间，改善区域生态环境。同时，加强对周边水体的保护和治理，实施河道清淤、生态护坡等工程，提升水体质量，实现了经济发展与生态保护的协同共进。

三、建筑与交通零碳化改造

推广绿色建筑技术，优化交通结构，降低用能强度。 建筑和交通是城市能源消耗和碳排放的重要领域，推广高效暖通空调设备、自然通风、余热回收等绿色建筑技术可以提高建筑的能源利用效率，减少建筑运营过程中的碳排放；与此同时，要建立以公共交通为导向的土地开发模式（TOD），建设“轨道上的城市”，打造 15 分钟生活圈。形成更加紧凑型的城市形态，从源头上减少出行距离，进而减少交通碳排放。出行结构优化方面，也要持续实施公交优先战略，大力发展轨道交通，全面提升公共交通服务水平和体验，促进全社会形成以绿色为导向的生产生活方式。通过降低建筑和交通的用能强度，可以显著加速城市内部产城融合项目的低碳发展。

【案例】青岛奥帆中心零碳社区

青岛奥帆中心零碳社区是我国零碳社区建设的典范。该社区采用海水源热泵，利用海水的温度差进行高效供热和制冷；光伏建筑一体化（BIPV）技术则将太阳能光伏板与建筑结构相结合，在不影响建筑外观和功能的前提下大幅降低了建筑碳排放。通过类似技术的应用，社区的建筑碳排放强度从 65kgCO_2/m^2・年降至 25kgCO_2/m^2・年以下，年减排量达 8663 吨。这不仅为居民提供了一个舒适、环保的居住环境，也为城市的低碳发展做出了贡献。

【案例】江岛智立方园区（江苏）

江岛智立方园区位于江苏，该园区的零碳科技馆应用光储直柔（太阳能光伏发电、储能系统和柔性用电设备结合）技术，实现了能源的生产、存储和消费的一体化。屋顶光伏年发电 1.3 万千瓦时，为园区提供了清洁的电力供应。与之相配套的电动车充电桩和低碳交通网络则可通过车网互动（V2G）技术有效缓解光伏发电的波动性，并提升车主的收益。通过这些措施，园区不仅实现了建筑和交通的零碳化改造，也为其他园区的发展提供了借鉴。

【案例】成都天府国际生物城

成都天府国际生物城的园区建筑，从规划设计阶段就充分考虑自然通风、采光和遮阳等因素。例如，生物城的研发办公楼采用大进深、小面宽的设计，增加自然采光面积；外立面采用遮阳百叶等措施，减少夏季太阳辐射得热，降低空调能耗。

园区大量使用本地生产的绿色环保建材，如再生骨料混凝土、新型保温隔热材料等。这些建材不仅具有良好的保温、隔热、隔音性能，而且在生产过程中能耗较低，符合低碳环保要求。

园区采用 “分布式能源站 + 多能互补” 的能源供应模式，利用天然气三联供系统实现冷、热、电的联产联供，提高能源综合利用效率。同时，结合屋顶光伏等分布式能源，构建低碳能源体系。

园区打造生态化的基础设施，建设生态湿地用于净化园区污水和雨水，通过植物的自然净化功能，减少污水处理厂的能耗和化学药剂使用，实现水环境的生态修复和低碳治理。

四、数智化协同管理与碳核算

通过数字化技术实现能源与碳排放的精准采集、实时监控与动态优化，突破传统人工核算的局限性。在零碳产城融合项目的建设中涉及到大量的生产和生活碳排放相关数据（如设备用电量、产线运行时间表、节能控制策略等），仅凭传统低效的人工抄表与碳排放计算远不能满足数据实时精准分析的需求。数字管理平台通过 AI 和仿真等多种数字化技术能够迅速识别能源消耗和碳排放的重点环节，从而采取针对性的措施进行优化，提高能源利用效率，降低碳排放。

【案例】施耐德电气武汉工厂的碳足迹数字化核查

施耐德电气作为全球知名的电气设备制造商，其武汉工厂在碳管理方面积极探索创新，采用了擎工互联开发的“碳擎 - 数字化碳管理与核查系统”。通过在生产设备上安装大量的物联网传感器”眼睛，实现了对生产环节能耗数据的实时采集。这些传感器就像工厂的能够精准地捕捉到每一个设备的能耗情况，并将数据实时传输到能碳管理与核查系统中。 为了确保数据的真实性和可靠性，该系统还结合区块链技术将采集到的能耗数据进行加密存储和记录，基于去中心化、不可篡改和可追溯的“安全账本”，保证了数据读写留痕、提升了数据的安全性和可信度。

此外，系统还内置了 ISO14064、GHG Protocol 等国际碳排放核算标准，系统能够根据这些标准模型对采集到的能耗数据进行自动分析和计算，生成符合欧盟碳关税要求的碳足迹报告。该系统还直接对接第三方认证机构 DNV，系统中存储的实时、准确的碳排放数据可以直接传输给 DNV。DNV 可以根据这些数据进行实时核查，大大缩短了核查时间。同时，系统还能够根据认证标准自动生成认证报告，实现了自动认证。最终，工厂将传统 3 个月的核查周期压缩至 7 天，极大地提高了认证效率。这不仅大大提高了碳核算的效率，还确保了报告的规范性和权威性，为企业应对欧盟碳关税提供了有力的支持。

【案例】山西焦煤集团双碳数字化管理平台

山西焦煤集团是我国重要的煤炭生产企业，煤炭生产过程中的碳排放问题一直是企业面临的重要挑战。为了实现碳减排目标，集团搭建了覆盖全集团 46 家子公司的碳资产管理系统。该系统集成了煤矿开采、洗选加工、运输等环节的碳排放数据。在煤矿开采环节，通过安装在井下的各种传感器，实时采集煤炭开采过程中的能耗、瓦斯排放等数据；在洗选加工环节，对洗煤设备的能耗、废弃物排放等数据进行监测；在运输环节，对煤炭运输车辆的油耗、尾气排放等数据进行记录。通过将这些数据进行整合和分析，集团能够全面了解整个生产过程中的碳排放情况。同时，系统运用机器学习算法对历史碳排放数据、生产计划、市场需求等多方面因素进行分析和学习，建立起碳配额缺口预测模型，集团可以提前预测未来一段时间内的碳配额缺口，并动态优化碳交易策略。

此外，山西焦煤集团的碳资产管理系统还具有多层级穿透管理的功能，可将碳排放指标分解至单台设备（如井下瓦斯抽采泵），通过对单台设备的碳排放进行实时监测，集团能够及时发现设备运行过程中的能源浪费问题，并采取相应的措施进行优化。

以山西王家岭矿为例，通过实时监测甲烷回收率较低的设备，集团及时对瓦斯抽采设备进行了技术改造，并加强了设备的维护和管理，使得甲烷回收率从 35%提升至 62%，年减排量达 8.2 万吨 CO_2e。这不仅减少了碳排放，还提高了煤炭生产的安全性和资源利用率。

【案例】 佛山顺德粤港澳协同发展合作区

顺德作为中国家电之都，粤港澳协同发展合作区内众多家电企业大力推进数字化转型。美的集团在园区的工厂实现了全面数字化生产，通过构建工业互联网平台，将生产设备、供应链、销售渠道等各个环节连接起来。利用大数据分析消费者需求，指导产品研发与生产计划制定；在生产过程中，运用自动化生产线和机器人，结合数字化管理系统，实现生产过程的精准控制和质量追溯。

园区内，不仅家电制造企业自身进行数字化转型，还带动了上下游配套产业的数字化升级。例如，一些零部件供应商通过接入家电企业的工业互联网平台，实现订单、库存等信息的实时共享，能够更精准地安排生产与配送。同时，园区内涌现出一批为家电产业提供数字化服务的企业，如提供工业软件、智能仓储物流解决方案的企业，形成了完整的数字化产业生态。

五、生态融合与碳汇能力建设

通过生态修复、碳汇林建设等自然手段抵消剩余碳排放。 尽管通过能源体系重构、产业低碳化、建筑与交通零碳化改造等措施可以大幅降低碳排放，但仍然可能存在一些难以避免的碳排放。生态融合与碳汇能力建设则可以通过植树造林、增加森林面积等自然手段来抵消这些剩余碳排放，并通过恢复生态系统的功能来进一步提高生态系统的碳汇能力。

【案例】青岛中德生态园

青岛中德生态园规划了 30%的绿地覆盖率，这为园区的生态建设提供了良好的基础。在绿地建设中，园区结合碳汇与生态修复技术，不仅有效保护和修复了生态系统，还显著增强了生态固碳能力。通过生态基底保护、低冲击开发等手段提升碳汇能力。例如修复河洛埠水库等水系，打造生态湿地公园，吸引赤麻鸭、白鹭等鸟类栖息，通过湿地生态系统增强固碳能力。同时生态园通过修复山体和建设城市公园体系等生态工程，使得森林覆盖率达到 38%，绿色空间占比 60%。

【案例】重庆 AIcity 园区

重庆 AIcity 园区利用垂直绿化和湿地系统形成碳汇补充，抵消园区运营阶段的残余排放。一方面通过在建筑物的外立面、屋顶等地方种植植物，增加城市的绿化面积，提高碳汇能力；另一方面园区通过建设湿地系统这一具有很强的碳汇功能的重要生态系统来吸收二氧化碳、改善园区的生态环境，为居民提供一个舒适、优美的生活空间。

【案例】 合肥综合性国家科学中心集成电路产业园区

依托中科大等科研院校的强大科研实力，在合肥综合性国家科学中心集成电路产业园区内设立多个集成电路研发平台，聚焦集成电路设计、制造工艺、关键装备等核心技术研发。例如，合肥微尺度物质科学国家研究中心的相关科研成果，为园区企业在芯片设计等领域提供了前沿技术支持，从源头把控产业核心竞争力。

园区涵盖了集成电路设计、制造、封装测试以及关键材料和设备等全产业链环节。像长鑫存储专注于动态随机存取存储器（DRAM）的制造，其发展带动了上下游一大批企业入驻。设计企业根据市场需求设计芯片方案，制造企业利用先进工艺将设计转化为实际芯片产品，封装测试企业对芯片进行封装和性能检测，材料和设备企业则为整个产业链提供基础支撑，各环节紧密协作。

通过定期举办产业论坛、技术研讨会等活动，促进产业链各环节企业之间的信息交流与技术合作。同时，园区管理机构搭建公共服务平台，为企业提供共享的测试设备、中试生产线等资源，降低企业研发和生产成本，加速科技成果转化，形成了良好的产业生态。

经过多年发展，园区已成为国内重要的集成电路产业集聚区之一，提升了我国在集成电路领域的自主创新能力和产业竞争力，吸引了大量相关人才和企业，带动了区域经济发展。

【案例】 苏州工业园区

苏州工业园区内构建了多层次、全方位的感知体系，包括基于 5G 的工业互联网感知设备、智能安防摄像头、智能物流传感器等。这些感知设备相互协作，实现对园区内人、车、物等各类对象的实时感知。例如，在智能制造企业中，通过工业互联网感知设备实时采集生产设备的运行参数，实现设备的预防性维护，提高生产效率和产品质量。

园区的各类智慧应用系统（如智慧能源管理系统、智慧环保监测系统、智慧交通管理系统等）采用微服务架构进行设计和开发。每个微服务独立运行，通过 API 进行通信和数据交互，便于系统的灵活扩展和维护。例如，当园区新增一个智慧停车应用时，可以方便地与现有的智慧交通管理系统进行集成，实现数据共享和业务协同。

园区根据数据的敏感程度和重要性，将数据分为不同级别和类别，并制定相应的管理策略。例如，对于涉及企业核心商业机密的数据和个人隐私数据，采取最高级别的加密和访问控制措施；对于一般性的城市运行数据，则在保障安全的前提下，适度开放共享。

园区对数据的使用和操作进行全面审计，记录数据的访问来源、使用目的、操作内容等信息。一旦发现数据违规使用行为，严格追究相关人员的责任。例如，通过数据审计发现某部门违规将企业的环境监测数据泄露给第三方，及时对相关责任人进行处罚，并采取措施防止数据进一步扩散。

在生态协同层面，与周边城市和园区建立数据合作机制，共享交通、产业等数据，实现区域协同发展。例如，与昆山、吴江等周边地区共享交通流量数据，共同优化区域交通网络，缓解跨区域交通拥堵。

园区大力扶持数据相关产业发展，吸引数据挖掘、数据分析、数据可视化等企业入驻园区。同时，鼓励传统企业利用数据技术进行转型升级。例如，一些制造业企业通过引入数据分析企业的服务，优化生产流程，降低生产成本，形成了数据驱动的产业发展生态。

六、政策机制与商业模式创新

建立碳交易、绿色金融等市场化机制，破解资金与技术瓶颈。零碳产城融合项目的建设需要大量资金和先进的技术。建立碳交易、绿色金融等市场化机制可以吸引社会资本的投入，为园区的建设和发展提供资金保障。同时，市场化机制还可以促进技术创新和产业升级，提高园区的竞争力和可持续发展能力。

【案例】Tan 路中和案例征集

Tan 路中和案例征集活动通过碳减排数据第三方认证和绿色债券融资，推动了园区技术方案的商业化。碳减排数据第三方认证可以确保碳减排数据的真实性和可靠性，为碳交易提供基础。绿色债券融资则可以为园区的建设和发展提供资金支持。通过这些措施，园区的技术方案得到了更好的推广和应用，实现了经济效益和环境效益的双赢。

【案例】北京市大兴区氢电耦合园区

北京市大兴区氢电耦合园区探索了氢能补贴与碳配额交易结合的模式，降低了企业的转型成本。氢能作为一种清洁能源，具有广阔的发展前景。但在氢能产业的发展初期，企业面临着技术研发、设备投资等方面的巨大成本。通过氢能补贴和碳配额交易，企业可以获得一定的经济支持，降低转型成本，提高企业的积极性。同时，这种模式还可以促进氢能产业的发展，推动能源结构的调整和优化。

【案例】中关村国家自主创新示范区

中关村国家自主创新示范区周边，高校与科研机构资源丰富，如清华大学、北京大学、中国科学院等。高校和科研机构的科研成果快速向园区企业转移转化。例如，北大在人工智能算法领域的研究成果，通过与园区内的字节跳动等企业合作，应用于其产品推荐系统、视频内容审核等业务场景，提升产品性能与用户体验。

企业深度参与高校科研项目。像百度与清华大学在自动驾驶领域开展联合研究，企业提供实际应用场景与数据支持，高校负责前沿技术攻关，共同推动自动驾驶技术发展。

中关村国家自主创新示范区形成了完善的创新创业服务体系，涵盖创业孵化、知识产权服务、科技金融等领域。例如，中关村创业大街汇聚了 3W 咖啡、创新工场等众多创业服务机构，为创业者提供办公场地、资金对接、创业指导等一站式服务。

活跃的产业集群效应显著，信息技术、生物医药、新材料等产业内企业之间交流频繁，构建了良好的产业生态。例如，在生物医药领域，研发企业、CRO（合同研究组织）、CMO（合同生产组织）企业等协同发展，加速新药研发进程。



第四章 产城融合项目的技术利用

在数字化与智能化的推动下，技术是推动产城融合项目发展的核心引擎。产城融合项目的高效运行、持续创新，离不开先进技术的深度渗透与巧妙运用。从智慧化管理到绿色可持续发展，技术的力量重塑着园区的生产生活模式。

第一节 能源管理

能源管理是产城融合项目可持续发展的关键环节之一。通过对能源的精细化管理和智能化调控，园区在实现低碳转型的同时，也为城市的绿色未来提供了新的思路。

一、智慧能源管理系统（BEMS）

欧洲大量园区通过数字化技术实现能源动态优化。

1. 荷兰埃因霍温高科技园区（Brainport Smart District）

AI 驱动的能源管理平台

埃因霍温高科技园区采用了先进的智慧能源管理系统，其核心是基于西门子 MindSphere 物联网操作系统的 AI 驱动能源管理平台。该平台整合了园区内 12 类能源数据源，包括光伏逆变器、热泵、储能系统、电动汽车充电桩及工业设备 PLC 等，形成全面的能源监控网络。

在算法层面，该系统采用 LSTM 神经网络模型（长短时记忆网络，是时序预测常用深度学习模型，适用于能源负荷预测）结合气象数据和园区生产排程，实现了未来 24 小时用电负荷预测，预测误差率控制在 8%以内。系统还利用混合整数线性规划算法动态优化储能充放电策略，以最小化外部电网购电成本和碳排放成本为目标函数，实现能源利用效率最大化。

硬件部署方面，园区安装了总容量达 5MWh、充放电效率高达 92%的特斯拉 Powerpack 储能系统，并配备了施耐德电气 EcoStruxure 微电网控制器，能够实现 10 毫秒级的实时响应，保障能源系统的稳定运行。

需量响应（Demand Response）系统

园区的需量响应系统在工业设备柔性调节方面表现突出。系统为注塑机、空压机等高载能设备加装 IoT 物联网电表，实时采集功率数据，并在电网电价高峰时段（如 0.35 欧元/千瓦时）通过 OPC-UA 协议（工业物联网通信协议标准）向设备 PLC（工业现场常用的自动化控制设备）发送指令，将非紧急生产任务延后执行，如将注塑机预热时段从下午 14:00 调整至晚上 22:00，有效降低高峰用电成本。

建筑负荷调节采用了模型预测控制技术，在电价低谷时段提前对办公楼进行预冷或预热，成功降低高峰时段空调负荷 30%。数据交互方面，系统采用 IEEE 2030.5（Smart Energy Profile 2.0）标准，确保光伏、储能、充电桩等设备互联互通，并通过区块链哈希加密上传企业能源数据，有效保护半导体工厂工艺能耗等商业机密。

图 8：荷兰埃因霍温高科技园区



图 9：德国汉堡 HafenCity 港口新城



来源：有方 Position

2. 德国汉堡 HafenCity 港口新城

区块链分布式能源交易平台

汉堡 HafenCity 港口新城的智慧能源系统以区块链分布式能源交易平台为特色。该平台采用了 Hyperledger Fabric 联盟链作为底层技术架构，这是一种许可制区块链，确保只有经认证的用户才能参与交易。平台通过智能合约自动执行绿电交易，支持基于供需平衡和电网拥堵程度每 15 分钟更新一次的动态定价机制，使能源交易更加灵活高效。

在用户端交互方面，企业和居民安装了符合 DLMS/COSEM 标准的智能电表，将用电数据上链存证，确保数据真实可靠。用户通过移动端 APP 可以查看实时电价和绿电来源（如特定公司的屋顶光伏或特定风电场），并根据个人偏好设置购电策略，如"优先选择本地光伏电力"，增强了用户参与度和选择权。

虚拟电厂（VPP）集成

港口新城还建立了完善的虚拟电厂集成系统，将分散的 2,300 个屋顶光伏（总容量 18MW）、1.5MWh 家庭储能以及港口岸电系统整合为一个虚拟电厂。在市场参与方面，虚拟电厂通过 EPEX SPOT 交易所在日前市场出售绿电，2022 年实现收益 320 万欧元；同时还提供响应时间不超过 30 秒的二次调频备用容量，年收益达 95 万欧元，有效盘活了分散的能源资产。

数字孪生仿真系统

该项目还采用了 Dassault Systèmes 3DEXPERIENCE 平台构建园区能源系统数字孪生体，模拟极端天气条件下的供能韧性。这一仿真系统的优化结果能够反哺物理系统，例如在 2021 年预测到极寒天气后，系统建议提前增加生物质锅炉储备，成功避免了供暖中断，提高了区域能源系统的韧性。

二、虚拟电厂+需求侧响应

在能源管理领域，日本的创新模式之一是，以虚拟电厂（VPP）和需求侧响应（DR）为核心，通过技术集成与市场机制设计，实现电力供需实时平衡，推动能源系统低碳化与智能化转型。

从技术机制来看，VPP 与 DR 构建起协同框架。VPP 借助物联网和能源管理技术，将用户侧的光伏、储能、电动汽车等分布式设备整合为“虚拟发电单元”。在发电侧，整合屋顶光伏等分布式电源优化出力曲线；储能侧利用家用蓄电池等设备平抑可再生能源波动性；负荷侧通过智能算法控制柔性负荷匹配供需。而 DR 分为价格诱导型和激励型，日本通过 OpenADR 2.0b 协议实现自动化，电力公司发送信号，用户端自动调整用电行为，且能实现秒级至小时级响应。技术融合方面，车网互动使电动汽车参与电网调节，AI 预测算法结合多数据优化调度策略。

这一集成化应用在多个产城融合项目中得到实践验证。横滨纲岛智慧城由松下主导，聚合区域内住宅、商业设施的分布式设备形成动态能源网络，利用 3D 城市建模平台实时监测并结合协议自动调节负荷，区域能源效率提升 30%，峰值负荷削减 15%，可再生能源渗透率达 40%。北九州智慧能源社区，一方面聚合工厂资源参与 DR 市场竞价，另一方面整合居民资源形成自平衡微电网，灾害时可孤岛运行。东京都“负瓦特市场”试点将用户节电行为量化交易，启动后年交易量达 95.8 万 kW，经济价值约 36 亿日元。

市场机制上，日本进行制度创新并运用金融工具。多层次电力市场包括基荷市场、容量市场、辅助服务市场，分别为 VPP 提供不同收益与机会。政策层面给予示范项目资助、税收优惠等激励。用户参与机制中，负荷集成商聚合资源参与交易，区块链技术试点降低交易成本。

从综合成效来看，VPP 与 DR 推动日本风光发电占比在 2023 年提升至 18%，部分社区超 35%，优化电网成本，预估节约 20%，还削减了碳排放。不过，目前仍面临市场风险、技术壁垒和政策协同等挑战，辅助服务价格波动影响投资信心，中小用户设备兼容性不足，电力改革需与其他政策进一步衔接。

三、多级能源管理

位于东京郊区的柏叶智慧新城是日本产城融合的标杆项目，其能源管理系统系统整合了三个层级的能源管理子系统：

- 片区级（AEMS）：统筹整个区域的能源生产、存储与分配，通过智能电网实现跨建筑群的能源共享；
- 建筑级（BEMS）：针对办公楼、商场等公共建筑，实时监控能耗并优化设备运行，例如通过楼宇自动化系统调节空调和照明；
- 家庭级（HEMS）：在住宅区安装家庭能源管理系统，帮助居民实时掌握用电数据并调整用能习惯。

该系统系统集成太阳能发电、蓄电池储能等分散式能源设施，形成区域内的“虚拟电厂”。例如，商业综合体“柏叶 LaLaPort”的太阳能电力会在工作日优先供应住宅区“GATE SQUARE”，假日则反向调配，实现了电力资源的动态平衡。通过物联网传感器和 AI 算法，实时采集区域内能源供需数据，预测负荷变化并优化电力交易策略。例如，系统可依据天气预报调整储能充放电计划，最大限度利用可再生能源。在灾害或电网故障时，通过储能设备和备用电源保障关键设施供电。

柏叶的能源管理系统是日本首个分散式能源共享网络，支持跨建筑、跨区域的电力交易。例如，区域内太阳能发电的过剩电力可通过智能电网出售给邻近社区，形成微型能源市场。通过动态调配和能效优化，区域整体电力消耗降低了 26%；结合绿色建筑设计（如太阳能板、中水回用等），部分建筑实现了 40% 的碳排放削减。AEMS 支持“双碳”目标下的能源转型，通过分布式能源网络降低对传统电网的依赖，增强城市在灾害中的抗风险能力。

柏叶的成功经验促使日本政府通过政策工具加速能源管理系统在全国普及，横滨等地均已开始应用。日本 EMS 的发展正指向三大方向：深化数据采集与分析，实现能源需求的精准预测与故障预警；加强太阳能、储能等分布式能源的接入与优化，提升系统韧性；推动电动车与电网协同（V2G 技术），促进能源双向流动。日本企业（如日产、三井不动产）已将 EMS 解决方案输出至东南亚、欧洲等地，形成技术辐射效应。

第二节 可再生能源例用

将太阳能、地热能等可再生能源技术融入园区规划与运营，有效降低了对传统能源的依赖，，推动产业与城市功能实现低碳可持续协同发展。

一、可再生能源

日本秉持“本地消纳优先”理念，通过光伏规模化应用、氢能社区化利用、生物质能与地热开发等多能互补模式，构建起分布式能源体系，以下从技术路径、典型案例及政策支持等方面展开详细分析。

在光伏规模化应用上，熊本县 17.17MW 山地光伏项目极具代表性。熊本县地处九州岛腹地，丘陵地形、30% 的平均坡度，加上台风频繁、火山灰酸性土壤等恶劣条件，为光伏开发带来巨大挑战。中国国瑞能公司凭借 “纵梁横置” 铝合金支架系统成功破局。技术层面，采用 6005T5 航空级铝合金材料，使支架系统重量减轻 65%，阳极氧化工艺形成的 10μm 保护层，让其耐腐蚀寿命超 30 年；预装式铝合金组件和零焊接全螺栓装配设计，不仅安装精度控制在 ±5mm，抗风载能力更达日本工业标准的 1.5 倍，在 2023 年九州 7 级强震中保持零损伤。经济效益显著，项目全生命周期平准化度电成本降至 9.2 日元 /kWh，运维成本降低 55%，土地复原成本减少 70%。同时，该项目获得日本经济产业省的大力支持，被列为重点示范工程，获得 24 亿日元补贴，地方政策还给予固定资产税减免 50%、企业所得税优惠 20%，10 年累计减免税额 4.8 亿日元。社会效益同样突出，带动当地 320 人就业，吸引 2 家配套企业落户，形成年产值 15 亿日元的新能源产业集群。此外，日本政府通过《第六次能源基本计划》明确 2030 年可再生能源占比目标，并推广竞价招标制度降低成本，如 2017 年光伏招标电价从 21 日元 /kWh 降至 17.2 日元 /kWh 。

氢能社区化应用方面，日本以横滨氢电实证项目与吹田 SST 氢能系统为代表，全力推动氢能产业链本地化。在生产与储存环节，横滨瑞穗码头利用风力发电制氢，年发电量 210 万千瓦时，保障 600 户家庭用电，并通过淘汰电池储能系统确保制氢连续性；川崎重工研发的液态氢运输船实现低价氢气进口，社区内高压储氢罐与移动加压车保障供应。应用场景广泛，交通领域，横滨部署燃料电池公交车等，叉车 3 分钟充氢效率远超电动叉车；住宅与商业方面，吹田 SST 用 5kW 纯氢燃料电池与光伏互补供电，松下家用燃料电池系统覆盖率达 80%，年减碳量超 2000 吨。日本还设定了 2030 年氢气产量、氢加气站、燃料电池汽车及家庭用氢能设备等量化目标。尽管氢能成本依赖补贴，但丰田开放专利推动技术普及，日本政府也计划通过补贴和技术创新，力争 2050 年氢发电成本降至天然气水平。

生物质能与地热开发在北九州智慧城项目中成果斐然。该项目以循环经济为核心，通过沼气发电年处理 3 万吨食品废弃物，满足工业园区 50% 用电需求，剩余热能用于供暖，综合能源自给率提升至 45%；九州地区地热电站利用二元循环技术提升发电效率。政策上，日本通过《家用电器循环利用法》等构建绿色回收体系，2021 年废塑料回收率达 86%，废旧家电回收率 64.8%，为生物质能提供稳定原料，同时政府给予生物质发电项目差额补贴并放宽环评审批。北九州项目每年减少碳排放 1.2 万吨，成为“零废物城市” 典范，吸引众多城市学习。

目前，日本产城融合项目的可再生能源布局成效显著。吹田 SST 实现 100% 可再生能源供电，灾害时可独立运行 72 小时；产城融合项目对 2030 年可再生能源占比目标的贡献率超 40%；从山地光伏到氢能全链条技术，创新驱动低碳转型。不过，仍面临可再生能源成本高、电网灵活性不足、氢能经济性依赖补贴等挑战。未来，日本计划通过扩大储能应用、优化电力市场机制、强化国际合作等举措，进一步推动可再生能源发展目标的实现。

新加坡正在研究以化学方式将回收塑料转换为高价值产品如热解油，这使得塑料垃圾从焚烧厂转移，制成“新生油”供应给本地能化业。

2021 年壳牌公司计划建造一个热解油升级装置，该设施位于 Pulau Bukom 的石化综合体中。这项计划会致力于把塑料废物转化为化学原料，是壳牌公司从石油天然气转向可再生能源和低碳的重要一步。目前壳牌在新加坡的相关项目已动工，该项目利用原本要被填埋的塑料垃圾制造一种石油产品，经过处理的热解油用于生产化学品，壳牌表示，一旦热解油升级装置在 2023 年开始生产，将成为亚洲最大的此类装置，该装置年处理垃圾能力将达到 5 万吨相当于 78 亿个塑料袋的重量。

壳牌公司还考虑在拥有 60 年历史的新加坡 Bukom 制造基地建设一个碳捕获和封存区域中心，以及一座年产 550,000 吨的生物燃料工厂，这将是壳牌在全球拥有的五个重要能源和化工园区之一。壳牌市场营销部分主管惠伯特・维格韦诺 (Hubert Vigeveno) 表示，这些新设立的项目是壳牌公司在新加坡计划到 2030 年将其自身业务的排放量从 2016 年的净排放水平减少一半的计划的一部分。

维格韦诺主管在热解油升级项目破土动工仪式上也表示“2021 年，我们已经将原油加工能力减半，这符合壳牌减少排放的全球目标”。贸工部长颜金勇也出席了壳牌公司的新项目开工仪式，他表示政府计划将裕廊岛转变为“可持续能源和化学品园区”，以可持续方式运营并在全球范围内出口可持续产品。

欧洲的可再生能源生产体系同样具有特色。

首先是分布式光伏规模化应用，法国里昂 Confluence 生态区展示了分布式光伏技术的成功应用。该项目采用了先进的光伏建筑一体化(BIPV)技术，选择了高效率达 21.5%的双玻双面 PERC 组件，这些组件巧妙地替代了传统的仓库屋顶彩钢板与立面玻璃幕墙。项目进行了精细的定制化设计，确保曲面屋顶与光伏组件弧度完美匹配，同时立面光伏采用了特殊的彩色薄膜技术，保持 40%的可见光透过率，在发电功能与建筑美学采光需求之间取得了平衡。

在系统集成方面，屋顶光伏系统接入了 1500V 电压的直流微电网，显著减少了交直流转换过程中的能量损耗，使系统整体效率提升至 92%。逆变器方面选用了华为 Sun2000 系列产品，这款设备支持智能 IV 曲线诊断功能，故障定位精度高达 99%，大大提高了系统的可靠性与维护效率。

项目同时整合了光伏车棚与储能系统的协同应用。车棚采用了 15°倾角的钢结构棚顶设计，通过 PVsyst 软件模拟优化了组件间距，有效避免了阴影遮挡问题。系统集成了宁德时代生产的磷酸铁锂电池液冷储能柜，容量达 500kWh，并配备了功率可在 7kW 至 22kW 之间动态调节的充电桩。在能源管理策略上，系统在日间优先使用光伏直接供电给充电设施，多余电量存入储能系统；夜间则充分利用峰谷电价差，通过储能放电满足园区的保安照明等基础负荷需求。

其次是地源热泵区域供热的应用，芬兰赫尔辛基 Kivistö 智慧社区的地源热泵区域供热系统展现了北欧国家在低碳供热领域的创新实践。

该系统采用了地埋管网络，使用双 U 型垂直地埋管技术，钻孔深度达到 300 米，按照 8 米×8 米的网格进行布局。这样的设计创造了 18 万平方米的地下热交换面积，总吸热量能力达到 45MW，为社区提供了强大而稳定的热能来源。

热泵机组选用了 Carrier 30XWHV 系列高温热泵，能够产生 75°C 的高温出水，完全满足芬兰严寒气候条件下的供暖需求。系统 COP 值(能效系数)高达 4.2，意味着消耗 1 度电能便可提取 4.2 度热能，比传统燃气锅炉节能 55%，大幅降低了能源消耗。

项目的一大技术亮点是采用了季节性蓄热(BTES)技术（通过地下钻孔网络实现大容量热能季节转移的技术）。夏季时，系统利用光伏发电的余电驱动热泵，生产 90°C 的热水并注入地下含水层储存；到了冬季供暖高峰期，再通过换热器提取这些热量，水温降至 30°C 后回灌至冷井，形成完整的热循环系统。为优化这一过程，项目使用 TRNSYS 仿真软件对储热和释热周期进行精确控制，实现了 68%的储热效率。与传统水罐储热每周损失 5°C 相比，该系统的热损失控制在每月仅 2°C，大大提高了能源利用效率。

再次是生物质能热电联产的应用，奥地利林茨 Blue Sky 园区的生物质能热电联产系统展示了生物质能在园区能源供应中的应用潜力。

该项目建立了完善的燃料供应链，原料组成包括 60%的林业废弃物和 40%的农业秸秆，经过破碎和干燥处理后，含水率控制在 15%以下，确保了燃料质量。项目实行 50 公里采购半径的原则，将运输过程中的碳排放控制在 0.8kg CO2/GJ 的低水平。

在发电系统方面，项目采用了 GE Jenbacher J920 燃气内燃机，燃用热值达 18MJ/m^3的生物质合成气。该系统发电效率高达 43%，热电比为 1:1.8，意味着每产生 1 度电能的同时，还能提供 1.8 度的热能，实现了能源的高效利用。

项目在资源循环利用方面也进行了创新设计。生物质气化产生的灰渣含有高活性硅酸盐，可替代 30%的水泥原料，用于生产低碳混凝土。灰渣经过重金属固化处理后，完全达到欧盟 EN 450-1 标准的环保要求。此外，项目还实施了碳捕集技术，通过胺法吸收处理烟气中的 CO2，年捕集量达 1.2 万吨，捕获的二氧化碳被用作温室大棚的气肥，实现了碳资源的循环利用。

二、储能技术

日本运用智能化与低碳化技术，对工业、建筑及交通领域的传统设备进行系统性改造，实现生产效率提升与碳排放降低的双重目标。

工业领域以 Nakano Mode 食品工厂为典型案例。作为大阪知名冷冻食品企业，其生产线高度依赖大型冷冻冷藏库，对电力稳定性要求严苛。鉴于日本台风、雷击等自然灾害频发，工厂常因停电中断生产。为此，Nakano Mode 引入中国首航新能源 40kWh 工业级储能系统（BTS 系列），并与 50kW 太阳能板联动，打造 “光储一体化” 能源解决方案。该方案技术亮点显著，采用 HYD 三相 3 线式储能架构，支持 20 - 280kWh 灵活组合；内置 PCU 支持零电压操作，具备 6 种运转模式，可根据电网负荷实时切换，

并通过云端远程监控升级；停电时能输出三相 200V 电力，保障冷冻库运行超 72 小时。改造成效突出，年用电成本减少 40%，碳排放量降低 120 吨，还获得日本多项政策补贴。这种光储协同模式不仅实现日常节电，更提升能源韧性，发那科工厂采用 AI 驱动机器人与 5G 互联，减少能耗 10 - 15%，为工业设备改造提供借鉴 。

建筑设备智能化改造在吹田 SST 智慧社区成效显著。作为日本首个 100% 可再生能源智慧社区，吹田 SST 围绕能源、安全、健康改造建筑设备。环境感知与动态调控方面，空调系统借助 GridEYE 红外传感器和 AI 算法，节能率达 25%；照明系统根据自然光照调节亮度，减少能耗 30%。社区级能源管理上，屋顶太阳能板搭配大型储能设备实现电力自给，外部电网中断时，微电网可独立供电 72 小时。丰田市通过家庭能源管理系统整合资源，降低家庭能耗 20%，进一步延伸了建筑智能化改造的应用场景。

交通领域，吹田 SST 构建起以可再生能源为核心的交通体系。引入本田 Clarity 燃料电池汽车，由社区光伏与储能系统供电，实现交通能源可再生化；与 Sunantas 合作的自动驾驶微公交，利用 L4 级技术和 AI 调度减少空驶率；充电桩与储能系统联动，降低充电成本 30%。日产汽车投资 1300 亿日元改造工厂，推进生产线电动化与供应链转型，目标 2030 年工厂碳排放较 2019 年减少 41%，展现交通设备改造的行业趋势。

综合来看，日本设备改造成效斐然。工业、建筑与交通领域综合能效提升 30 - 50%，运维成本降低 55%，有效支撑了 2030 年工业能耗再降 10%、2050 年碳中和的政策目标，为全球产城融合中的设备改造提供了成功范例。

地处赤道附近的**新加坡**，常年光照充沛，是发展太阳能产业的天然沃土。如今，新加坡是世界上太阳能最密集的城市之一。太阳能发电具有间歇性，为了保持电网的可靠性，新加坡在部署储能系统（ESS）来解决太阳能间歇性问题并增强电网弹性。2023 年 2 月，新加坡在裕廊岛启动了一个 285 兆瓦时的储能系统。这是东南亚最大的储能系统，在 6 个月内投入使用，是世界上部署速度最快的储能系统。

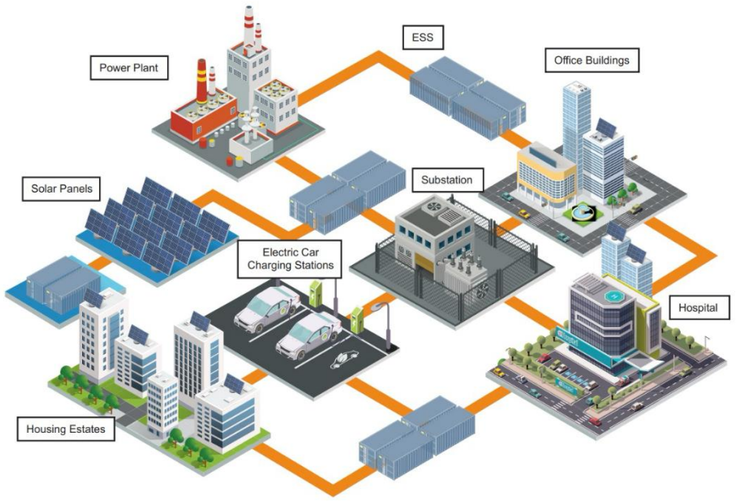
新加坡于 2020 年 10 月在变电站部署了首个公用事业规模的储能系统，其容量为 2.4 兆瓦 (MW)/2.4 兆瓦时 (MWh)，相当于每天为 200 多户四室 HDB 家庭供电。 ESS 将参与批发电力市场，提供缓解太阳能造成的间歇性以及减少峰值需求所需的服务。它还将提供有关新加坡炎热潮湿环境下 ESS 性能的见解，并协助制定此类部署的技术指南。

图 10：新加坡辅助储能系统



来源：胜科工业

图 11：新加坡储能系统 ESS 模型图



来源：EMA Resources Educational Materials Handbook Energy Storage System

欧洲的储能系统也别具特色。

电化学储能方面，英国伦敦科技城（Tech City）的电化学储能系统展示了现代城市能源转型的成功案例。该项目采用了完善的储能系统架构，核心设备选用了特斯拉 Megapack 2.0 储能单元[2]，这种设备单机容量达到 3.9MWh（直流侧），在 80%深度放电条件下可实现 6,000 次的高循环寿命。在电力变换方面，项目配置了 SMA Sunny Central Storage 逆变器，其效率高达 98.5%，且支持在 0.1 秒内实现满功率响应，确保了系统对电网波动的快速反应能力。

系统集成方面，该项目实现了与园区 8.5MW 屋顶光伏系统的协同运行，成功将发电出力的 5 分钟平均波动率控制在 3%以下，显著提高了可再生能源的并网稳定性。此外，项目还创新性地引入了车网互动（V2G）技术（电动汽车在充电完成后，能够将车载电池中的电能反向输送至电网，实现与电力系统的双向能量流动），接入了 50 辆日产 Leaf 电动车，总电池容量达 5MWh，这些车辆可参与电网调频，聚合响应时间不到 500 毫秒，为电网提供了灵活的辅助服务能力。

在运行策略上，系统充分利用电价差进行峰谷套利，在夜间低谷电价时段（0.08 英镑/kWh）充电，午间高峰时段（0.35 英镑/kWh）放电，日均循环 1.2 次。系统还能够动态调整充放电阈值，灵活响应英国 Octopus Agile Tariff 等动态电价机制。同时，系统向国家电网（National Grid ESO）提供动态遏制（Dynamic Containment）服务，通过补偿±0.5Hz 范围内的电网频率偏差，获得了占总收益 40%的辅助服务收入。

氢储能方面，荷兰鹿特丹港氢能枢纽项目展示了氢储能技术在大型工业园区的应用潜力。该项目建立了完整的绿氢生产与存储体系，采用 20MW 碱性电解槽（蒂森克虏伯技术），电流密度达 6kA/m²，基于低热值（LHV）计算的效率达 75%。系统直接耦合海上风电，省去了整流环节，使弃风利用率提升至 95%，实现了可再生能源的高效转化。

在储运设施方面，项目利用地下盐穴进行大规模氢气储存，储存压力达 100bar，容量达 4,000 吨，日泄漏率控制在 0.01%以下，保证了储存的安全性与经济性。对于氢气的运输，项目采用液氢槽车将产品输送至 200 公里半径内的周边工业园区，构建了区域氢能供应网络。

[2] 特斯拉 Megapack 2.0 为特斯拉公司推出的新一代大型电化学储能系统，单台储能单元的直流侧额定容量为 3.9 兆瓦时（MWh），具备高循环寿命、模块化集成和远程运维等特点。

氢能的综合利用是该项目的突出特点。在工业脱碳方面，绿氢供应给炼油厂替代原有的灰氢（天然气重整工艺），年替代量达 3,000 吨，减少碳排放 26 万吨/年。项目还在港区燃气轮机中掺入 20%体积比的氢气，使氮氧化物（NOx）排放下降 35%。在氢燃料电池发电领域，项目部署了 2MW 的 Ballard FCveloCity 质子交换膜燃料电池系统，在调峰时实现 60%的效率，年运行时间达 4,000 小时，为港区提供了清洁灵活的电力支持。

机械储能方面，瑞士苏黎世工业园的机械储能项目展示了飞轮储能技术在高精密工业环境中的应用价值。该项目部署的 Beacon Power 飞轮单机容量为 25kW/50kWh，最高转速可达 16,000rpm，采用抗拉强度高达 4,800MPa 的碳纤维转子，确保了系统的高安全性。设备采用真空磁悬浮轴承技术，将摩擦损耗控制在 0.1%/小时以下，大大提高了能量存储效率。

这套飞轮储能系统主要应用于两个关键场景。一是电压暂降补偿，园区内的半导体工厂对电压波动极为敏感，允许中断时间不超过 20 毫秒。飞轮系统能够在检测到电压跌落 3%的情况下，在 3 毫秒内快速放电提供支撑，保障了生产的连续性和产品质量。二是微电网黑启动，4 台飞轮并联可提供稳定的初始频率（50Hz±0.1），在 5 秒内成功启动柴油发电机，为园区提供关键的应急启动能力。

项目创新地构建了混合储能系统，将飞轮与超级电容（Maxwell 300kF）协同工作。超级电容负责承担纳秒级的脉冲负荷，如激光切割机等高功率瞬时设备，而飞轮则应对秒级波动。系统采用基于负荷频谱分析（FFT）的能量管理策略，能够动态分配充放电指令，实现了不同时间尺度下的能量平衡。

第三节 设备改造

日本运用智能化与低碳化技术，对工业、建筑及交通领域的传统设备进行系统性改造，实现生产效率提升与碳排放降低的双重目标。

工业领域以 Nakano Mode 食品工厂为典型案例。作为大阪知名冷冻食品企业，其生产线高度依赖大型冷冻冷藏库，对电力稳定性要求严苛。鉴于日本台风、雷击等自然灾害频发，工厂常因停电中断生产。为此，Nakano Mode 引入中国首航新能源 40kWh 工业级储能系统（BTS 系列），并与 50kW 太阳能板联动，打造 “光储一体化” 能源解决方案。该方案技术亮点显著，采用 HYD 三相 3 线式储能架构，支持 20 - 280kWh 灵活组合；内置 PCU 支持零电压操作，具备 6 种运转模式，可根据电网负荷实时切换，并通过云端远程监控升级；停电时能输出三相 200V 电力，保障冷冻库运行超 72 小时。改造成效突出，

年用电成本减少 40%，碳排放量降低 120 吨，还获得日本多项政策补贴。这种光储协同模式不仅实现日常节电，更提升能源韧性，发那科工厂采用 AI 驱动机器人与 5G 互联，减少能耗 10 - 15%，为工业设备改造提供借鉴 。

建筑设备智能化改造在吹田 SST 智慧社区成效显著。作为日本首个 100% 可再生能源智慧社区，吹田 SST 围绕能源、安全、健康改造建筑设备。环境感知与动态调控方面，空调系统借助 GridEYE 红外传感器和 AI 算法，节能率达 25%；照明系统根据自然光照调节亮度，减少能耗 30%。社区级能源管理上，屋顶太阳能板搭配大型储能设备实现电力自给，外部电网中断时，微电网可独立供电 72 小时。丰田市通过家庭能源管理系统整合资源，降低家庭能耗 20%，进一步延伸了建筑智能化改造的应用场景。

交通领域，吹田 SST 构建起以可再生能源为核心的交通体系。引入本田 Clarity 燃料电池汽车，由社区光伏与储能系统供电，实现交通能源可再生化；与 Sunantas 合作的自动驾驶微公交，利用 L4 级技术和 AI 调度减少空驶率；充电桩与储能系统联动，降低充电成本 30%。日产汽车投资 1300 亿日元改造工厂，推进生产线电动化与供应链转型，目标 2030 年工厂碳排放较 2019 年减少 41%，展现交通设备改造的行业趋势。

综合来看，日本设备改造成效斐然。工业、建筑与交通领域综合能效提升 30 - 50%，运维成本降低 55%，有效支撑了 2030 年工业能耗再降 10%、2050 年碳中和的政策目标，为全球产城融合中的设备改造提供了成功范例。

欧洲在设备节能改造中，瑞典斯德哥尔摩皇家海港采用了先进的工业设备升级方案，实现了显著的节能减排效果。其中，热回收系统成为区域能源集成的典范，成功将钢铁厂的余热用于区域供暖，覆盖周边 1.2 万户家庭，每年减少碳排放 4.8 万吨。同时，园区内制造业的空压机变频改造也取得了显著成效，压缩空气系统能耗降低了 28%，且投资回收期不到 3 年，展现了工业设备升级的经济可行性。

皇家海港的工业余热回收系统进行了高效的设计。在余热来源与捕获方面，系统针对园区内钢铁厂高温冶炼炉产生的 1200°C 高温烟气进行回收利用。这些原本直接排放的热量通过陶瓷换热器被有效捕获，将烟气温度从 800°C 降至 200°C，实现了 65%的热回收效率。随后，回收的热能通过高效的热泵系统（COP=3.2）提温至 90°C，成功接入斯德哥尔摩的区域供热网络，能够满足最高 110°C 的供热需求。

系统集成设计采用了双回路结构，确保安全和效率。一级回路在钢铁厂内部形成闭式循环，使用防腐蚀管道输送乙二醇溶液，有效避免了工业环境对系统的侵蚀；二级回路则与市政热网对接，通过板式换热器将热量安全传递到城市供热系统，实现了工业余热与民用供热的无缝衔接。

智能调控是系统高效运行的关键。基于 ARIMA 模型的热网负荷预测技术使系统能够动态调节余热输出优先级，优先满足基本供热负荷，并在需求高峰时启用燃气锅炉进行补充，确保供热系统的稳定性和可靠性。

根据 2023 年数据，该余热回收系统在能源效益方面表现出色，年回收热量达到 320 吉瓦时，满足了周边 1.2 万户家庭的供暖需求，占区域供热总量的 18%。系统每年替代天然气消耗 2900 万立方米，减少碳排放 4.8 万吨，相当于种植 200 万棵树的固碳效果，对区域减碳目标贡献显著。

从经济性角度看，项目总投资 2400 万欧元，获得了欧盟"地平线 2020"计划 30%的补贴支持。按照每吨 80 欧元的碳价计算，项目投资回收期为 7 年，具有良好的经济可行性。钢铁厂通过该项目每年节约碳税支出 380 万欧元，同时市政供热公司降低了 15%的购能成本，形成了多方共赢的局面。

皇家海港园区的空压机系统变频改造项目针对园区内汽车制造厂的阿特拉斯·科普柯 GA 系列螺杆空压机进行了优化升级。这些原本采用定频运行的空压机额定功率高达 250 千瓦，能源效率提升空间巨大。

技术方案主要包括加装 ABB ACS880 变频器，根据气压传感器信号动态调整电机转速，实现 30-100%负荷范围内的连续调节。同时，配套的储气罐压力优化算法将设定压力带从原来的±0.5 巴缩窄至±0.2 巴，有效减少了空压机的启停次数，降低了机械磨损和能源浪费。

项目还融入了智能运维理念，安装了振动与温度传感器，通过 SKF IMx 预测性维护平台提前预警轴承故障，使维护成本降低了 40%，延长了设备使用寿命。

改造后一年的数据显示，空压系统的单位产气能耗从 0.12 千瓦时/立方米降至 0.086 千瓦时/立方米，降幅达 28%。全年节电量达 1.7 吉瓦时，相当于减少碳排放 1,200 吨。经济效益方面，改造总成本为 35 万欧元（含硬件与软件），年节约电费 25 万欧元，投资回收期仅为 1.4 年。此外，由于减少了机械冲击，设备寿命从原设计的 10 年延长至 12 年，进一步提升了投资回报率。

第四节 循环经济

循环经济是破解资源约束、实现绿色转型的关键技术之一。

一、物资循环

日本北九州生态工业园是日本首个生态城项目，以资源循环利用和产业共生为核心定位，旨在通过企业间的资源共享与废物交换，实现“零废弃”目标。

园区内企业通过协作形成资源互补网络。例如，家电回收中心对废旧电器进行拆解，提取金属、塑料等材料重新投入生产，制成新产品，每年减少数万吨废弃物填埋。园区内钢铁厂与水泥厂合作，钢铁废渣直接供应水泥生产，减少原材料开采需求，同时降低废渣填埋成本。

园区采用先进的物理分离与化学处理技术，提升资源回收效率。例如，电子垃圾中贵金属（金、银、铂）的提取率超过 70%，塑料和铜铝等材料也被高效分类再利用。同时园区还引入物联网（IoT）与大数据技术，实时监控能耗、设备状态及环境数据。例如，通过智慧能效系统（EEM）远程采集水电消耗数据，优化能源分配；定位系统（IPT）追踪人员与物流路径，提升管理效率。

园区整合光伏发电与储能系统，结合微电网动态调度，提升可再生能源利用率。例如，工业废热转化为区域供暖，减少化石能源依赖。

通过一系列技术措施，北九州生态工业园碳排放显著下降，周边空气质量与水质改善，生态修复效果显著。企业运营成本降低，如某工厂通过废渣再利用年节省原料成本数百万日元。循环经济产业创造大量就业岗位，推动区域经济增长。

二、水资源循环

欧洲的循环技术，以水资源循环和碳捕集利用（CCU）为例。

在水资源闭环系统方面，德国鲁尔区 Emscher 公园实施了全面的工业废水处理与回用系统。

废水处理流程首先采用旋流分离器进行预处理，有效去除悬浮物至 50mg/L 以下；随后通过膜生物反应器(MBR)结合反硝化滤池进行生化处理，COD 去除率超过 95%；最后经过反渗透(RO)和紫外线消毒的深度处理，使最终产水质量达到欧盟 98/83/EC 饮用水标准。处理后的水资源主要用于两个方向：60%作为工业冷却水回用，每年替代市政供水 290 万吨；其余部分用于生态补水，恢复 Emscher 河支流水体，使区域水生生物多样性提升了 40%。

公园同时建设了完善的雨水资源化系统，采用海绵城市理念，铺设了渗透率达 15mm/h 的透水铺装，配合总蓄水量达 5000 立方米的生态滞留池。收集的雨水经过人工湿地净化后，用于园区绿化灌溉，雨水资源利用率达到 85%。

图 12：德国鲁尔区 Emscher 公园



来源：mooool 网站

丹麦哥本哈根 HARBOUR 污水处理厂则建立了完整的能源自给系统。其核心是污泥厌氧消化工艺，每吨污泥可产生 450 立方米沼气，这些沼气被用于驱动 1.2MW 的燃气轮机发电。系统还回收约 90°C 的余热用于消化罐加热，使整个处理厂的能源自给率达到 105%，实现了能源正盈余。此外，厂区采用 AirPrex 工艺从污泥灰分中提取磷元素，年产磷酸钙($Ca_3(PO_4)_2$)约 800 吨，有效替代了部分进口磷肥。

处理厂还创新性地开发了出水热能回收系统。利用处理后恒温约 12°C 的出水作为热源，配合 COP 值达 5.1 的热泵系统，为周边社区提供热能，年供热量达 15GWh。

图 13：丹麦最大的污水处理厂



来源：state of green

三、碳捕集与利用（CCU）

欧洲的循环技术，以水资源循环和碳捕集与利用（CCU）为例。

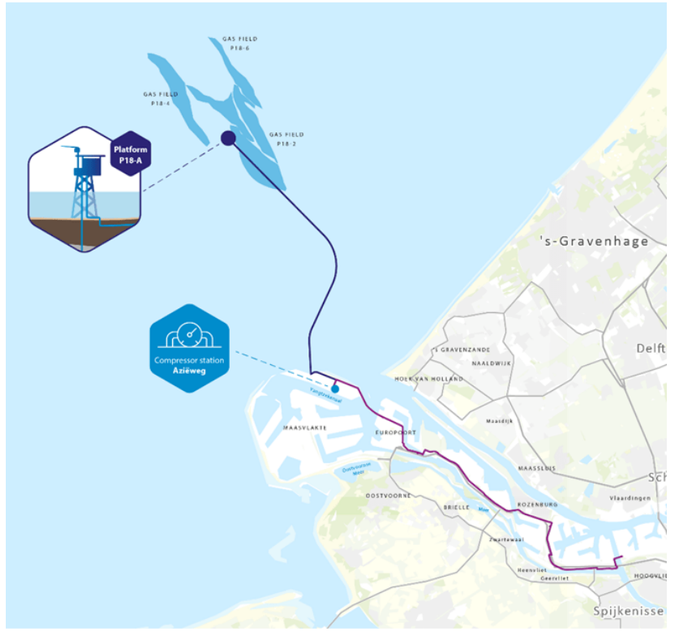
蒙斯塔德工业园区实施了先进的碳捕集与利用技术，针对其园区内 400MW 天然气发电厂和炼油厂催化裂化装置每年约 150 万吨的二氧化碳排放进行处理。该项目采用胺法吸收技术（壳牌公司开发的新型高效胺类碳捕集专用溶剂，适用于燃烧后烟气二氧化碳捕集工艺）作为燃烧后捕集方案，特别选用了壳牌 Cansolv DC-103 溶剂，该溶剂在 40-60°C 的吸收塔温度下能够选择性地吸收二氧化碳。与传统 MEA 溶剂相比，这种技术将再生能耗降低了 30%，仅需 3.2GJ/吨 CO_2。捕集后的二氧化碳经过加压至 110bar 并液化处理，最终达到超过 99.9%的纯度，通过槽车运输至各利用终端。

二氧化碳的利用路径主要分为两种：一是微藻养殖，园区建设了 10 公顷的光生物反应器，将捕集的二氧化碳注入以促进绿藻(Chlorella vulgaris)的生长，年产藻粉达 1.2 万吨。这些藻粉随后被加工成生物柴油（转化率 30%）和富含蛋白质（含量 55%）的动物饲料。二是强化采油(EOR)，将部分二氧化碳注入北海油田，不仅提升了原油采收率 8%-12%，这种方式的碳封存率高达 95%（根据 IPCC 认证）。

荷兰鹿特丹 Porthos 碳枢纽则打造了一个跨行业的综合碳管理网络，建设了 30 公里的高压二氧化碳管网，将港口区的炼油厂、化工厂和制氢厂连接起来，年输送能力达 250 万吨。这一管网采用 X70 高强钢材质并配备抗腐蚀涂层，设计压力达 100bar，确保运输安全与效率。捕集的二氧化碳被输送至北海 P18-4 枯竭气田进行封存，注入深度达 3000 米，储存容量高达 1.2 亿吨。项目配备了精度达 0.01%的实时监测系统，全天候监控潜在泄漏风险。

除了碳封存，Porthos 项目还开发了创新的二氧化碳转化技术。通过利用风力发电驱动 SOEC（固体氧化物电解槽）电解槽，可在 700～900°C条件下直接利用可再生电力将二氧化碳与水共同电解生成氢气和一氧化碳，随后经甲烷化反应转化为合成甲烷，转化效率达 75%。该系统每年可生产 5 万吨合成气，有效替代部分进口天然气，提升能源自主性。

图 14：Porthos 项目的二氧化碳运输和封存路线



来源：Porthos

第五节 智慧交通

日本丰田 Woven City（编织之城）是丰田汽车公司打造的全球首个以“未来移动出行”和“智能生活”为核心的综合实验城市，旨在通过自动驾驶、人工智能（AI）、机器人及物联网（IoT）等前沿技术的深度集成，探索未来城市生活的可能性。

整个园区道路分为自动驾驶专用道（测试氢能驱动的 e-Palette 车辆）、行人步道、小型代步工具（如滑板车）通道，物理隔离优化交通流，减少人车冲突。e-Palette 不仅是交通工具，还可转换为移动商店、物流车或共享办公空间，支持无障碍设计，服务残障人士。

城市内嵌入了大量传感器、摄像头和通信设备，实时监测交通流量、车速、环境条件等信息。通过云平台和大数据分析，这些数据能够帮助调控交通信号、动态优化路线，降低拥堵风险，提高整体交通效率。利用车联网技术，实现自动驾驶车辆与道路、交通信号灯、应急系统等设备之间的无缝通信，从而在车辆行驶过程中不断调整和优化行驶策略，保障安全高效运行。届时预计减少交通拥堵 20%-30%，通勤时间缩短 15%，氢能驱动实现零碳排放。

第六节 无废城市

新加坡人口众多，但土地资源稀少，这导致“垃圾围城”问题格外突出。2013 年，新加坡产生了超 785 万吨垃圾，足以填满 14,950 个奥运规格的游泳池。尽管其中有 60%得到回收，但仍有 7,740 吨垃圾需要送到当时的 4 大垃圾焚烧发电厂进行焚烧。而且焚烧产生的灰烬和不可焚烧的废物（如化学废物）也不得不占用土地进行填埋，而新加坡现存唯一的垃圾填埋场——实马高垃圾填埋场将在 2035 年耗尽。

在这样的背景下，新加坡提出建设“无废城市”，并经历了两个重要时期：一是 2014 年发布《新加坡可持续蓝图 2015》（The Sustainable Singapore Blueprint，以下简称《蓝图》），标志着国家层面的无废城市总体规划出台，提出建设“零废弃”国家愿景和总体目标；二是 2019 年发布的《零废物总体规划》和专门针对食品、包装和电子废弃物管理的《可持续资源法案》，进一步强化了总体目标，并提出了实现目标的主要措施。

具体而言，《蓝图》提出通过减量（Reduction）、再利用（Reuse）和再循环（Recycle），努力实现食物和原材料零浪费，并尽可能将其再利用和回收，给所有材料第二次生命，使新加坡成为一个“零废物”国家。到 2030 年，废物综合回收率达到 70%，生活垃圾回收率从 2013 年的 20%上升到 30%，非生活垃圾回收率从 2013 年的 77%上升到 81%。为此，《蓝图》提出四项措施：在新组屋中建设可回收物品垃圾溜槽、在更多组屋中引入气动垃圾运输系统、建立一个综合性的废物管理设施分离可回收物品、减少食品饮料行业的垃圾和改善电子废弃物回收利用。

2019 年，《规划》在《蓝图》的基础上进一步提出，为了延长实马高垃圾填埋场的使用寿命，将每人每天产生的不可回收垃圾从 2018 年的 0.36kg 减少到 2030 年的 0.25kg，这相当于将 2018 年产生的飞灰和填埋垃圾减少 30%。

《可持续资源法案》则从法律的角度明确了食品、包装和电子废物管理三大优先领域并提出三项具体目标：产品生产商应承担产品变成垃圾时的收集和处理费用；鼓励包装制造商实行包装减量、重复使用和循环利用；实行食品垃圾分类和妥善处理。另外，《法案》制定了 2020-2025 年的阶段性目标和路线图。

表 2:《可持续资源法案》阶段性目标

时间	目标
2020 年	包装强制报告制度
2021 年前	电子废物生产者责任延伸制度
2024 年起	食品垃圾强制分类处理制度
2025 年前	塑料和包装行业生产者责任延伸制度

发展循环经济，实现源头减量

以自愿为原则的联合倡议，旨在减少占新加坡生活垃圾重量三分之一的包装废弃物。自 2007 年推出第一个 SPA 以来，已有 200 多个组织共同参与减少包装垃圾。截至 2019 年，累计减少了约 54,000 吨包装废物，节省了 1.3 亿美元的包装成本。同时，环境署还于 2020 年开始实行强制性包装报告框架，要求年营业额超过 1000 万美元的包装产品生产商和超市必须报告他们投放市场的包装数据和他们的包装 3R 计划。新加坡还出现了许多无包装商店，其商品比有包装的商店在价格上更具竞争力，以此来鼓励居民购买无包装商品。

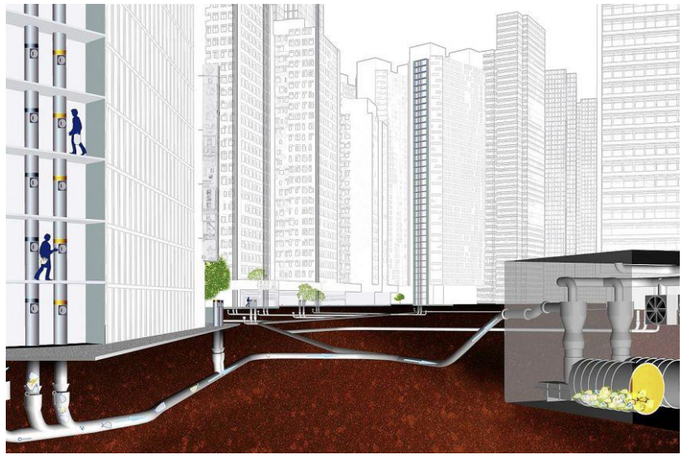
对于含有害物质的电子产品，新加坡自 2017 年就对六价铬、多溴联苯、多溴二苯醚、铅、汞、镉这六种有害物质进行了限制，以避免其由于处置不当而进入环境。自 2018 年 3 月 31 日起，新加坡已逐步淘汰所有含汞量超过 5 ppm 的电池（包括纽扣电池）。2020 年 1 月 1 日前，荧光灯（超过特定汞限值）和非电子测量设备等某些添加汞的产品的生产、进出口也被逐步淘汰。

从消费端而言，新加坡有较完善的绿色产品标识，如绿色标签计划（Singapore Green Label Scheme，SGLS）、家用电器强制性能源标签计划（Mandatory Energy Labelling Scheme， MELS）和缩减包装的标志，它们确保认证产品对环境影响最小或使用可回收的材料制成，从而引导消费者优先购买此类产品，政府部门则要根据公共部门环境可持续性倡议（Public Sector Taking the Lead in Environmental Sustainability，PSTLES）带头采取绿色公共采购政策。新加坡环境署从 2015 年 11 月还启动了减少食物浪费的宣传计划，以提高公众意识，鼓励理性消费，从而减少食物浪费。2017 年又发起了“零废弃自带袋子”活动，鼓励消费者在购买食品、饮料和杂货时使用可重复使用的袋子和容器。目前，已有 400 多家零售店加入该活动，为自带可重复使用物品的顾客提供奖励，这节省了大约 200 万件塑料一次性用品和包装材料。2019 年 6 月 8 日还启动了“对减少浪费说是”运动，倡导公众“做出正确的选择，选择可重复使用的东西”，例如，可重复使用的瓶子、袋子或食品容器而不是一次性用品。

加强基础设施，提高废物回收率

新加坡拥有高达 60%的垃圾回收率，这首先得益于新加坡拥有良好的垃圾收集基础设施。首先，新加坡规定，组屋的每一层必须配备可回收和不可回收两个集中式溜槽，使居民更容易投放可回收物品，从而提高回收率。在大型商场附近安装反向自动售货机，回收地区，垃圾长期存放易产生臭味和虫害，甚至可能引发和传播疾病。为此，新加坡要求新建组屋必须配备气动废物输送系统（Pneumatic Waste Conveyance System，PWCS）。这些系统通过隐藏在地下的管道网络抽吸空气，将废物有效地输送到小区甚至整个区的中心位置。这将极大地减少臭味和虫害，让居民享受更宜居的生活环境。智能气动垃圾输送系统还可以监控垃圾投放的频率以优化垃圾收集周期，减少垃圾收集和运输的人工及交通，节约人力和能源。

图 15：气动废物输送系统示意图



来源： waste-management-world

针对有害电子垃圾，新加坡环保署 2012 年发起了一项名为“回收电子废物”（Recycling nation’s electronic waste, RENEW）的计划。截至 2019 年 3 月，该计划已经在 400 多个地点放置了 450 多个垃圾箱，收集了 320 多吨电子垃圾，仅 2018 年就收集了 126 吨垃圾，比 2012 年多 2 吨。同时，新加坡从 2021 年开始实行生产者延伸责任制，要求电子产品 生产商（包括制造商和进口商）对其产品的报废处理承担物理或财务责任。这意味着他们 需要收集并确保产品由获得许可的公司回收。具体处理电子商品的运营商将由环境署任命，负责开发电子产品回收系统，包括安排收集时间、提供电子垃圾箱、将电子垃圾运送到获 得许可的回收商并向环境署报告电子垃圾的吨位。面积超过 300 平方米的大型电子产品 零售商必须在店内提供电子垃圾收集点。生产太阳能光伏 (PV) 面板和服务器的生产商必 须根据客户需要为所有报废设备提供免费回收服务。

新加坡建筑废弃物、黑色金属和有色金属的回收率接近 100%，这主要得益于建设局（Building and Construction Authority，BCA）实施的拆迁协议（Demolition Protocol）。根据这一协议，在拆迁之前，必须先识别建筑物中可重复使用和不可重复使用的部分，然后分别拆除和移除。可重复使用的部件包括管道和电线，它们被放置在单独的垃圾箱中并送到回收设施。污染的混凝土碎片，例如天花板和瓷砖等不可回收废弃物将被丢弃。只有当建筑物被拆解到只剩下框架时，才能开始拆除。

运用先进技术，实现无害化处置

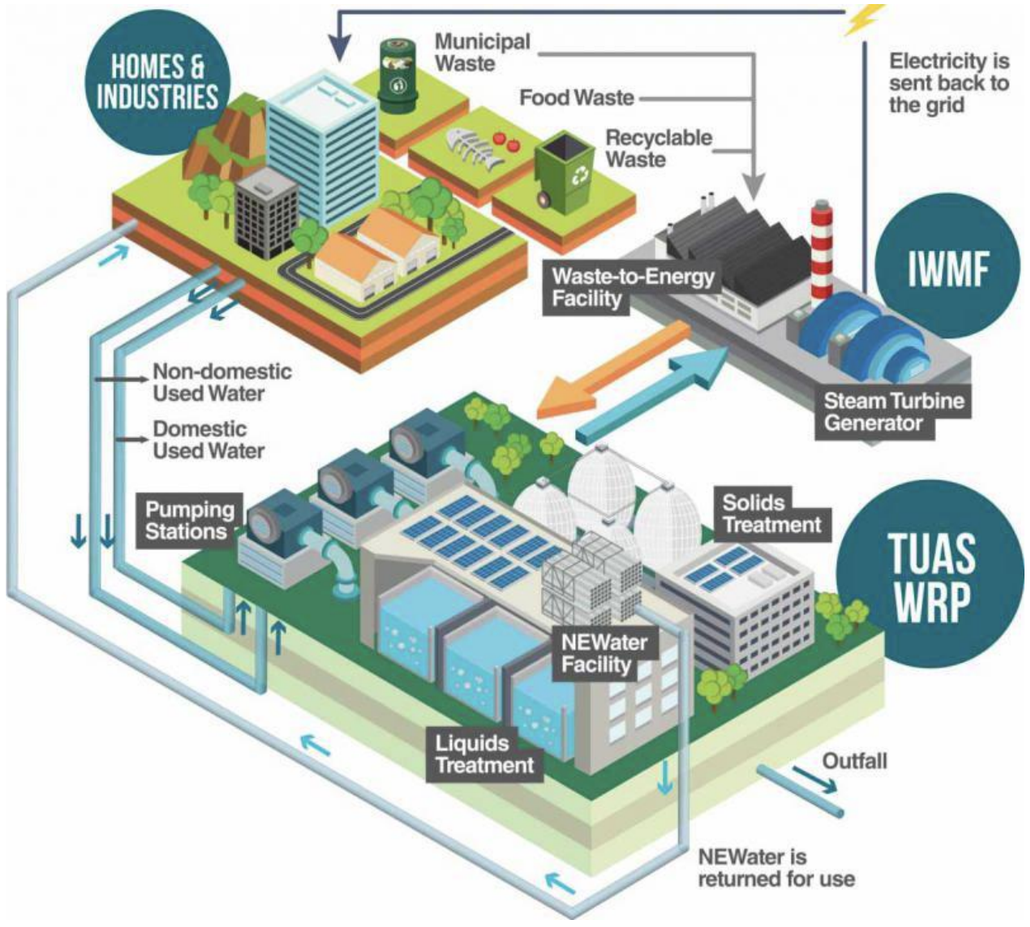
针对食物垃圾，新加坡要求，从 2021 年开始，所有预计会产生大量食物垃圾的新商业和工业场所必须在其设计规划中为食物垃圾就地处理系统分配和预留空间。该系统可将食物垃圾转化为非饮用水、液体营养物质或堆肥，然后用于屋顶花园等。这不仅节省了商家的垃圾处理费用，还制造了有机肥。同时，从 2024 年开始，大型商业和工业厨余生产商必须将厨余垃圾分类，但他们可以选择最适合的厨余垃圾处理方法，如安装食物垃圾就地处理系统，或将食物垃圾送到场外处理设施。

对其他无法进行回收的垃圾，新加坡主要通过焚烧来进行处理。1979 年，新加坡耗资 1.3 亿美元建造了第一座垃圾焚烧发电厂。此后，又陆续新建了大士垃圾焚烧发电厂（1986 年）、圣诺古垃圾焚烧发电厂（1992 年）、大士南垃圾焚烧发电厂（2000 年）和吉宝西格斯大士垃圾焚烧发电厂（2009 年）。这 5 座垃圾焚烧发电厂每日可焚烧垃圾 7600 吨，极大地减少了垃圾填埋量，从而节约了土地资源。新加坡正在建设第 6 座垃圾焚烧厂——TuasOne Waste-to-Energy Plant。该焚烧厂占地面积 4.8 公顷，每天可焚烧 3600 吨垃圾，将满足新加坡未来 25 年的垃圾焚烧需求。建成后，它将成为世界上最集约的工厂，也将是新加坡现有垃圾焚烧发电厂中最节能的一个。

新加坡还将建设一个集污水处理(Integrated Waste Management Facility，IWMF)和固废处理(PUB's Tuas Waste Reclamation Plant，TWRP)于一体的工厂 Tuas Nexus。它可以同时处理多种垃圾，从而减少不必要的运输和碳足迹。例如，IWMF 生产的水可以供垃圾处理厂进行使用，产生的污泥可以和厨余垃圾一起进行处理，这比单独处理污泥可产生 3 倍多的沼气。这些沼气可以输送给固废处理厂，用来提高蒸汽的温度，从而最大化电力生产。脱水后的污泥可直接送到 TWRP 进行燃烧发电，产生的电力可以用于 IWMF 和 TWRP，多余的电力可以上网;产生的蒸汽可以供污水处理厂用于热水解工艺，预处理污水中的污泥和含油废物;污泥干燥产生的冷凝水可以输送到 IWMF 进行处理。该项目第一期于 2024 年完成，第二期将于 2027 年完成。

对于无法进行焚烧的垃圾以及焚烧后产生的飞灰仍然需要进行填埋处理。上世纪 90 年代，当位于 Lorong Halus 的最后一个内陆垃圾场的空间用完后，新加坡于 1995 年建立了第一个离岸垃圾填埋场——实马高垃圾填埋场（Semakau Landfill)。该垃圾填埋场占地面积达 350 公顷，可容纳 2800 万立方米的废物。在建设过程中，新加坡采取了多项措施尽可能减少对环境的影响，包括种植 400,000 棵红树林，以及在工作区附近安装淤泥筛网减少沉积物对珊瑚的影响等，完整地保存了当地的生物多样性。

图 16：集污水处理和固废处理于一体的工厂——Tuas Nexus



来源：TUAS NEXUS

新加坡作为一个热带岛国，人口多，面积小，很早就面临着“垃圾围城”的问题。从 2014 年提出建设“无废国家”以后，新加坡首先通过发展循环经济，从生产端和消费端入手，实现垃圾源头减量。其次，通过加强基础设施，如设立可回收和不可回收垃圾溜槽、建立气动垃圾回收系统，提高废物回收率。最后，通过运用先进技术，如建立垃圾焚烧厂、Tuas Nexus、对垃圾填埋场进行生态修复等，最终实现无害化处理。

第五章 产城融合项目的发展趋势

产城融合项目正站在新的发展节点。从技术赋能到生态构建，从低碳转型到人才协同，一系列趋势正重塑其发展逻辑。

一、 数字技术驱动产城协同进化

随着信息技术的飞速发展，数字化和智慧化成为产城融合项目发展的必然趋势。园区将利用大数据、物联网、云计算、人工智能等新一代信息技术，实现园区管理的智能化、精细化。通过建设智慧能源管理系统、智慧交通系统、智慧安防系统等，提高园区的运行效率和管理水平。

1. 数据神经网络的全局渗透

智慧城市建设将突破“单点智能”阶段向“系统智能”跃迁。通过全域数据中心平台整合政务、产业、民生数据流，实现城市资源动态优化配置。全球领先的产城融合实践表明，物联网与人工智能正在重构城市运行逻辑。如日本柏叶智慧城市利用 AI 与传感器网络，结合地理信息系统（GIS）技术，对人流和环境进行深入分析，实现城市设施的预防性维护管理，提前排除潜在问题，确保空间使用的高效与安全；横滨海滨的楼宇能源管理系统（BEMS），通过 AI 算法实现建筑群能耗动态平衡，写字楼和商业楼宇通过该系统实现了峰值削减超过 20%；横滨海滨的家庭能源管理系统（HEMS），通过能源使用可视化帮助用户识别高耗能设备，指导用户调整用能行为，进而减少了 20%的能源消耗，并通过鼓励消费者限制用电来抑制电力需求。

2. 人工智能赋能产业升级

人工智能是引领新一轮科技革命和产业变革的战略性技术，是新型工业化的重要推动力。人工智能也正在推动产城融合项目智慧化升级，从简单的效率助手发展为整合资源、连接上下游的全新基础设施，通过实时数据优化园区管理，智能调配产业链资源，带动整个行业协同发展。产城融合项目正在从传统的产业集聚向智能化、生态化、全球化的创新生态转型。如企业利用 AI 技术进行生产流程的智能化改造。某家制造企业通过机器学习和深度学习，对工艺参数进行优化，显著提高了生产效率，降低了能源消耗。利用数据分析和学习能力实现的智能决策，推动产业实现智能化转型；AI 技术将推动园区产业向垂直化和生态化方向发展，催生了新的商业模式和产业生态。深圳新一代信息产业园聚焦 5G 射频前端领域，集聚 26 家核心企业，形成从材料到设备的 15 分钟产业闭环。

3. AI 技术将重构园区的运营模式

通过 AIoT（人工智能物联网）和数字孪生技术，实现全场景智能管理。如西安国际人工智能创新园以人工智能、数字金融、综合能源管理、智能医疗、创新创业为主导的产业生态圈，吸引优质高端人才和创新要素聚集，致力于产业与城市高度融合、绿色低碳可持续发展的产业社区，打造行业新标杆。

二、 绿色技术重塑城市代谢系统

在生态文明建设的大背景下，绿色生态成为产城融合项目发展的重要方向。园区将加强生态环境保护和建设，推广绿色建筑、清洁能源，打造生态景观和绿色空间。通过优化产业结构，引入低能耗、低污染的绿色产业，实现经济发展与环境保护的良性互动。

1. 能源闭环与资源再生利用

在产城融合项目里，工厂和社区共建资源循环网，把环保重点从"事后治污"转为"生产全程用清洁技术"，居民区配套生态公园，厂区余热梯级利用为社区供暖，屋顶及建筑墙面等建设光伏项目为生产、生活供电，处理后的中水用于园区绿化等。通过产业和城市设施深度连接，既保障企业发展，又提升居民生活品质，真正实现"变废为宝"的绿色转型。

欧盟“工业共生 2025”计划显示，未来产业园区将形成跨行业的物质流交换网络，如炼钢厂余热驱动数据中心冷却系统，半导体工厂的废硫酸用于污水处理厂中和反应等；哈马碧生态城的“物质流闭环”模式中污水厂沼气发电满足社区能源需求，垃圾焚烧余热为园区供暖，形成“资源输入-转化-再生”完整链条；横滨海滨通过 CO_2 捕获技术，将废物焚烧厂废气中分离和回收的二氧化碳经微生物甲烷化设施转化为生物甲烷，用于燃料供应等领域。

2. 绿色基建的协同效应

产城融合项目将采用多项绿色基础设施协同建设，通过系统耦合产生 1+1>2 的生态效益，使组织具备生态自调节能力。如新加坡碧山宏茂桥公园的智能生态堤岸，通过传感器监测水位变化，自动调节植物群落结构以增强防洪能力；中德生态园的地源热泵系统与光伏建筑一体化设计，提高可再生能源占比；日本柏叶的“海绵城市”体系，通过透水地面与雨水花园设施的组合应用，减少地表雨水流失，同时促进雨水自然渗透与资源化利用。

三、 绿色低碳双轮驱动产城融合创新

随着中国经济向高质量发展转型，产城融合项目将加速产业高端化进程。一方面，园区将积极引入高新技术产业、战略性新兴产业，如人工智能、生物医药、新能源等，逐步淘汰落后产能，优化产业结构。另一方面，创新驱动将成为园区发展的核心动力。园区将加大对科研创新的投入，建设各类创新平台，如产学研合作基地、科技企业孵化器、众创空间等，鼓励企业开展技术研发和创新。

1. 低碳战略引领产业布局

未来产城融合项目的发展以低碳战略为核心，通过系统优化能源结构和空间组织，重构产城融合项目的产业生态系统。其以碳约束为刚性导向，推动高附加值、低环境负荷的智慧型产业形成核心集群，并通过循环代谢网络实现资源要素的闭环流动，让工厂和城市设施“共享资源、减少浪费”。高耗能产业被绿色科技、数字服务等低碳产业取代，形成上下游联动的“生态链”，让产业和居住、商业空间高效融合，最终形成经济-社会-生态协同增效、资源要素闭环流动的可持续发展范式，实现产业革新、城市功能与自然系统深度耦合的高质量发展格局。

2. 绿色物流重构供应链网络

未来产城融合项目的物流网络将化身“绿色智能动脉”——企业用电动货车、共享氢能重卡替代传统柴油车队，仓库屋顶铺满光伏板为运输供电，实现“装货零碳、跑路零污”；同时通过 AI 算法动态规划配送路线，让多批次货物“拼单”运输，减少空驶能耗（比如电商与生鲜企业共享冷链车）。把充电站、分拣中心融入社区商业体，让物流网成为串联产业与生活的绿色纽带，推动园区迈向“车轮不冒烟、货流不断线”的低碳未来。如鹿特丹港的氢能源货运系统，2023 年实现港口内部运输 100%零排放，氢燃料电池卡车单次补能续航突破 800 公里；DHL 在德国莱比锡枢纽部署的 AI 路径优化系统，通过实时分析天气、路况和订单数据，使配送车辆空驶率下降 37%；亚马逊“最后一公里”计划中，无人机配送占比已达 15%，包装材料碳足迹较传统模式减少 62%（麦肯锡，2023）。

在数字技术优化城市管理、绿色理念重塑产业根基、人文关怀回归生活本质的三重变革中，产城融合正引领城市发展走向新阶段：通过智能系统破解资源错配难题，建立产业与自然共生的循环体系，最终聚焦人的幸福感重构空间价值。这种转型将催生"人才驱动创新—创新升级产业—产业滋养城市—城市培育人才"的良性闭环，推动城市从机械扩张转向有机生长，使技术赋能发展、生态承载产业、人文定义未来形成统一体，最终构建起既能自我更新、又可持续传承的新型文明载体。



参考文献

1. 禹湘。国家试点工业园区低碳发展分类模式研究 [J]. 中国人口・资源与环境，2018, 28 (09): 32-39.
2. 曾振，周剑峰，肖时禹。产城融合背景下传统工业园区的转型与重构 [J]. 规划师，2013, 29 (12): 46-50.
3. 宣蔚，郑炘。低碳能源系统与城市规划一体化的理论构建 [J]. 规划师，2014, 30 (11): 82-86.
4. 郑琦。转型视野下的创意城市与低碳城市的耦合关系研究 [J]. 社会科学，2010 (11): 19-25.
5. 李毅。产业园区绿色发展评价指标体系构建研究 [J]. 上海节能，2023 (4): 442-447.
6. 金隅兴发科技园：低碳智慧园区构建多元价值生态 [J]. 城市开发，2023 (9): 58-59.
7. 王亚光，许新宇. “双碳” 背景下中小地块近零碳路径的规划探索 —— 以深圳盐田港规划物流园区为例 [C]// 中国城市规划学会。人民城市，规划赋能 ——2022 中国城市规划年会论文集（08 城市生态规划）. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司，2023: 10-21. DOI:10.26914/c.cnkihy.2023.048398.
8. 董立延，李娜。日本发展生态工业园区模式与经验 [J]. 现代日本经济，2009 (06): 11-16.
9. 林健，吴妍妍。日本生态工业园探析 —— 以北九州生态工业园区为例 [J]. 华东森林经理，2008 (01): 53-57.
10. 杨巍，包丽凯。日本智慧城市建设的经验及借鉴意义 [J]. 中国工程咨询，2020 (02): 78-85.
11. 零碳智慧园区 2022 白皮书。全国信标委智慧城市标准工作组，2022.01.
12. 零碳园区创建与评价技术规范. T/SEESA 010-2022. 上海市节能环保服务业协会.
13. 生态环境部等十五部门联合印发《关于建立碳足迹管理体系的实施方案》.
14. 中央经济工作会议在北京举行 习近平发表重要讲话.
15. 发展改革委办公厅就做好产城融合示范区建设工作发文.
16. 加快 “零碳园区” 建设的几点建议，赛迪智库.
17. 建设零碳园区需久久为功。光明网.
18. 经开分局创新探索 “科产城人” 融合都市泛园区模式.
19. 全生命周期减碳，须打出绿色设计 “先手牌”.
20. 阿特斯集团在日本首次长期脱碳电源竞拍中成功中标 193 兆瓦电池储能系统项目。阿特斯官网.
21. 日本丰田 “编织之城” 规划建设情况及启示。经济学人 - 手机前瞻网.
22. 日本神奈川县整活！太阳能发电助力建设零碳数字城镇示范区。同花顺经济网.
23. 福岛浪江町计划建造 100% 利用可再生能源的产业园区。搜船网.
24. 三菱重工建设长崎碳中和产业园推进能源脱碳化。搜船网.
25. 电装、京瓷、松下：启动实证实验，以确立 CO_2零排放技术.
26. 对标国际产城融合 北郊未来产业园带动宝山北升级。凤凰网.
27. 日本筑波科学城。百度百科.
28. 日本的 TOD - TOD 新城，另辟蹊径的城市更新。拓方博客.
29. 日本智慧城市建设如何才能节能？. 智慧城市网.
30. 到 2030 年减少 41% 碳排放！日产拟斥资 1300 亿日元打造绿色工厂。东方财富网.
31. 日本第六次更新能源计划，离 “零碳社会” 还有多远？. 21 财经.
32. 田正，刘云：日本构建绿色产业体系述略。复旦大学一带一路及全球治理研究院.
33. 日本电池储能市场的潜力。北极星储能网.
34. 直击 SNEC | 融和元储智慧台区解决方案大放异彩。北极星储能网.
35. 斯德哥尔摩皇家港零碳社区：从棕地到可持续生态新城。世界资源研究所.
36. 皇家港口智能生态城揭秘：瑞典改造废旧工业用地。中国经济网.
37. Altunbey P Z, Balta S, Ortaçeşme V, et al. Smart environment practices in Kashiwa-No-Ha (Japan) smart city[J]. Acta Hortic. Regiotect, 2023, 26(2): 137-146.
38. Gornik M. Smart Governance: Kashiwa-no-ha Smart City in Japan as a model for future urban development?[M]. DEU, 2020.
39. 丰田耗资 100 亿建造日本首座智能城市。数艺网.
40. 【商机】丰田智能新城动工 日媒对标中国雄安。搜狐汽车.
41. Machine Tool & Acccessory Magazine - 台湾工具机暨零组件工业同业公会 MA 工具机与零组件杂志.
42. 日本跨区域科学城京阪奈给我们什么启示丨北大国际经济观察。新浪新闻.
43. 中国科学技术发展战略研究院日本筑波科学城发展的启示研究。中国科学技术发展战略研究院.
44. 日本科学技术创新政策的变迁及新动向。网易订阅.
45. 中日技术产业信息网【智慧城市】（2）横滨智能社区：系统动态联动确保电网稳定。人民网.
46. 出海七十年，日本何以 “再造一个日本”？南方周末.
47. 传统制造产业链，如何升级为 “专精特新” 集群？惠州土地网.
48. 产城融合全靠它！宝山五年蜕变计划 — 北郊未来产业园 - 上海搜狐焦点.
49. 大阪梦咲地区产城融合路径 | 新能源 | 能源产业_网易财经.

50. “回归田园”，日本能阻挡 “乡村消失” 吗 | 日本 | 东京_凤凰资讯.
51. 日本的 tod - TOD 新城，另辟蹊径的城市更新 - 拓方博客.
52. 顾晓、邱昌茂等：日本经济特区及投资税收优惠政策_贸法通.
53. 不止精益，解码日本制造业的多元进化密码 | 日本 | 日本制造业 | 自动化_新浪新闻.
54. “回归田园” 日本能阻挡 “乡村消失” 吗_共产党员网.
55. 園首度造訪日本吹田 SST 綠能智慧城鎮啟發永續新願景 | 新頭條 - TheHubNews.
56. 桃園首次獲邀參訪日本智慧城吹田市 AI 交流打造永續城市 | NEWS586.
57. 日本最火的名词 —— “地方创生” 政策__财经头条.
58. 贸易摩擦对战后日本现代化进程的影响 - 中国社会科学院日本研究所.
59. 周末荐读 | 从需求侧响应到虚拟电厂 —— 看日本如何攻克电力供需实时平衡难题 - 周杰 - 中国能源报 - 太阳能发电网.
60. “纲岛智慧城” 开城，携手共建未来都市_前瞻财经 - 手机前瞻网.
61. 基于 OpenADR 扩展的错峰业务仿真平台设计。储界网.
62. 从需求侧响应到虚拟电厂 —— 看日本如何攻克电力供需实时平衡难题 - 第 2 页 - 北极星输配电网.
63. “纲岛智慧城” 智能起航，展望未来 - IT 业界_CIO 时代网 - CIO 时代 — 新技术、新商业、新管理.
64. 日本电力需求侧管理实践启示 - 北极星储能网.
65. 点智慧灯杆日本制造业秘密武器：仅仅凭此占全世界的半壁江山！升哲资_人工智能 - 中原富国科技网.
66. 走入自然灾害频发区，首航储能有效应对停电 - 北极星储能网.
67. 恰有好「储」，首航为自然灾害频发区保电护能_首航新能源.
68. 山地狂想曲 | 国瑞能熊本 17.17MW 玩转光伏支架新魔法.
69. “痛并快乐着” —— 日本的可再生能源发展之路 - 市场活动 - 看资讯 - 中华厨房电器用具批发网.
70. 日本第六次更新能源计划，离 “零碳社会” 还有多远？ - 21 财经.
71. 田正 刘云：日本构建绿色产业体系述略 - 国内专家 - 复旦大学一带一路及全球治理研究院.
72. 直击 SNEC | 融和元储智慧台区解决方案大放异彩 - 北极星储能网.
73. 鹿特丹港务局年度报告（2023）.
74. 麦肯锡《绿色物流革命报告》（2023）.
75. 朱鹏杨《产城融合 3.0：数字时代的空间革命》（2023）.
76. 人民网：优化城市服务，满足居民多元需求（国际视点）.
77. 中国日报中文网 人工智能赋能数智园区，科大讯飞发布数智园区 3.0 解决方案.
78. 深圳市物业管理行业协会 万科云城 | 科技驱动的产城融合未来开放式智慧园区（2024）.

INTRODUCTION

上海现代服务业联合会
Shanghai Services Federation

关于上海现代服务业联合会

上海现代服务业联合会，是由本市主要从事服务业的行业协会、学会、商会等社会组织及企事业单位自愿组成的跨行业、跨领域的综合性枢纽型非营利社团组织。拥有会员单位1500余家，其中200余家为行业协会、学会、商会等社会组织，覆盖了金融、信息、科技、商务、生产、公共、专业服务等多个领域，基本囊括上海市服务业的所有行业。

以联合会为主发起设立了上海现代服务业企业促进中心、上海经贸商事调解中心、上海现代服务业发展研究院、上海现代服务业发展基金会、上海现代服务业标准创新发展中心等五个民非实体机构，并牵头成立长三角现代服务业联盟，具有全面服务社会、助推经济发展的综合实力和核心竞争力。

2024年3月，上海市商务委关于印发《加快提升本市涉外企业环境、社会和治理（ESG）能力三年行动方案（2024-2026年）》，明确上海现代服务业联合会承担着“加大对ESG理念的宣传力度”的主要任务。

荣续智库

关于荣续ESG智库研究中心

荣续ESG智库研究中心，致力于推动“绿色共赢”的可持续发展理念，成为企业ESG发展的长期伙伴。我们通过ESG行业研究、优秀案例研究、政策和标准研究、热点和趋势分析等，解决气候变化、环境、社会、公司治理等领域的信息缺乏或信息不对称的问题，为企业提供可落地、可复制、可持续的ESG 解决方案，帮助企业践行ESG理念，创造长期价值。

荣续智库研究中心汇聚了各行业的ESG专家和研究员，他们在各自领域拥有丰富经验和卓越能力。这些专家大部分是来自品职教育的ESG持证学员。品职教育拥有超过百万的活跃ESG学习社群，以及超过3万名ESG人才组成的人才库，是荣续智库坚实的人才资源。

荣续智库将继续发挥行业经验，秉持深刻洞察力和强大执行力，帮助企业将ESG有效整合到核心战略中，助力企业在ESG领域实现突破，创造社会和经济双重价值。

上海现代服务业联合会
Shanghai Services Federation

荣续智库

ESG白皮书系列

01	纺织服装行业ESG白皮书	11	包装行业ESG白皮书	21	机械储能行业ESG白皮书	31	通信设备行业ESG白皮书	41	电力行业ESG白皮书
02	食品饮料行业ESG白皮书	12	印刷行业ESG白皮书	22	电化学储能行业ESG白皮书	32	家居装饰行业ESG白皮书	42	物业行业ESG白皮书
03	汽车行业ESG白皮书	13	包装印刷行业ESG案例白皮书	23	化学储能行业ESG白皮书	33	互联网教育行业ESG白皮书	43	有色金属行业ESG白皮书
04	化工行业ESG白皮书	14	家电行业ESG白皮书	24	出海欧盟 行业ESG白皮书	34	医疗器械行业ESG白皮书	44	零碳物流园区发展白皮书
05	环保行业ESG白皮书	15	美妆行业ESG白皮书	25	银行绿色金融行业ESG白皮书	35	医疗卫生行业ESG白皮书	45	零碳园区发展白皮书
06	新能源行业ESG白皮书	16	钢铁行业ESG白皮书	26	跨境电商行业ESG白皮书	36	康复辅具行业ESG白皮书	46	传媒行业ESG白皮书
07	半导体行业ESG白皮书	17	物流及航运物流行业ESG白皮书	27	光储充行业ESG白皮书	37	酒旅行业ESG白皮书	47	造纸行业ESG白皮书
08	医药行业ESG白皮书	18	航空物流行业ESG白皮书	28	电子元器件分销行业ESG白皮书	38	零碳产城融合项目发展白皮书	48	煤炭行业ESG白皮书
09	财会行业ESG白皮书	19	建筑行业ESG白皮书	29	建筑材料行业ESG白皮书	39	零碳产城融合项目案例白皮书	49	基建行业ESG白皮书
10	金融“一带一路”ESG白皮书	20	储能行业ESG白皮书	30	通信服务行业ESG白皮书	40	白酒行业ESG白皮书	50	气候金融ESG白皮书

合作咨询请联系

（扫码添加联系人）

欢迎关注荣续ESG智库研究中心

为您提供最新的ESG资讯

共同探索可持续发展的未来