

AIDC电源系列02： SOFC主电源逻辑明朗，产业加速步入上行期

证券分析师：黄细里

执业证书编号：S0600520010001

证券分析师：郭雨蒙

执业证书编号：S0600525030002

2026年6月6日

报告核心观点



- **SOFC—高效/清洁的发电新选择**：SOFC由电堆和外围BOP组成，将化学能转化为电能，可直接输出直流电，与其余燃气发电/燃料电池相比，在发电效率、负荷、燃料依赖性等多方面优势显著。从应用端看，2024年SOFC约有50%用于商业领域（供暖供热等），约有40%应用于数据中心发电。
- **电堆成本约占整个系统的30%以上（若去掉逆变器可达40%以上）**：DOE 2017年数据显示，电堆约占整个SOFC系统成本的34%左右，其中约48%为电池本体，连接体（金属双极板）/密封件/端板分别占比约6.4%/4.7%/8.4%；
- **BE引领电解质方案步入商业化浪潮，三类方案本质殊途同归**：SOFC技术路线可按照支撑体形式分为电解质/电极（主要为阳极）/金属支撑体三大类。其中电解质已步入大规模商用，龙头为BE，市场份额可达60-70%。
- **具体来看**：1) **电解质支撑体SOFC**以厚电解质层换取电池刚性强度，但要求运行温度在900℃以上，使得电池+BOP均需要使用耐高温材料，材料端成本较高；2) **阳极支撑SOFC**运行温度更低+材料选择性更广，但会存在阳极极化+常用材料易氧化&热膨胀等问题；3) **金属支撑SOFC**用金属体提供刚性支撑，进一步降低运行温度，且支撑体一般采用不锈钢，成本低廉，是上述方案中材料端降本空间最大的方案，主要厂商为Ceres Power及获其授权并持股Ceres的潍柴动力。
- **北美缺电供需出现缺口&区域供给不平衡**：1) **需求端**：美国劳伦斯伯克利国家实验室预测到2028年，数据中心用电量将激增至328~580TWh；2) **供给端**：美国电网装机规模增长缓慢、老旧火力发电机组加速退役，电网设备老旧、稳定性差。**缺电现状**：当前美国发电项目并网审批平均等待时长约为18-30个月，等待周期长；2025年，AIDC用电需求驱动美国电价平均增长7.1%，其中价格涨幅前十的州中，PJM区域占据一半。
- **离网发电大势所趋，SOFC迎来新机遇**。当前离网主电源方案主要为：燃气轮机、燃气内燃机、SOFC。燃气轮机短缺加剧，交付周期延长+价格上涨，SOFC受益于OBBBA法案，经我们测算，在30%ITC减免后LCOE低至0.066美元/kWh，与燃气轮机涨价后的LCOE接近，且交付周期显著更短，具备初步经济性。
- **BE屡获大单，产业趋势明朗**。自2024年起，BE先后获AEP、Brookfield、Equinix (EPC)、甲骨文、Nebius等多类型头部厂商订单，并持续上调业绩指引+产能预期。国内潍柴动力持有Ceres Power 19.9%的股份，当前已获得技术授权，MW级别项目落地在即。
- **我们预测用于AIDC发电的SOFC市场规模如下**：2026年为366亿元，2030年为3081亿元，CAGR为70.37%，2030年对应SOFC渗透率为22%，对应功率约为17GW。
- **投资建议**：看好SOFC发展趋势，国内首选具备确定性电堆制造能力的【潍柴动力】。
- **风险提示**：产能扩张不达预期；北美用电需求低于预期；地缘政治动荡风险。



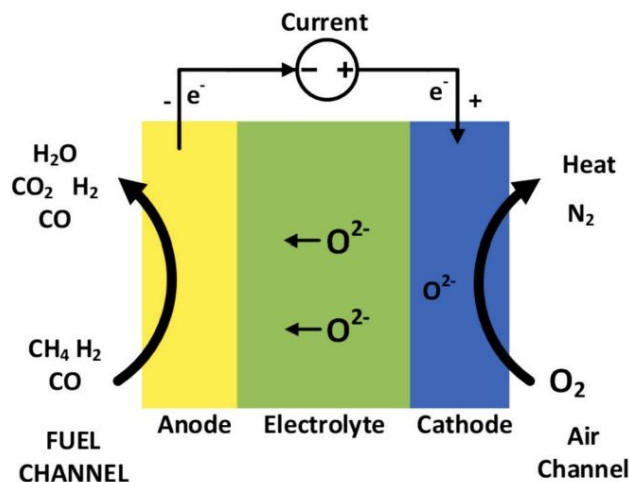
- 1. SOFC—高效/清洁的发电新选择
- 2. 北美缺电带动SOFC主电源逻辑上行
- 3. 产业进展加速，BE屡获大单
- 4. 投资建议及风险提示

1. SOFC—高效/清洁的发电新选择

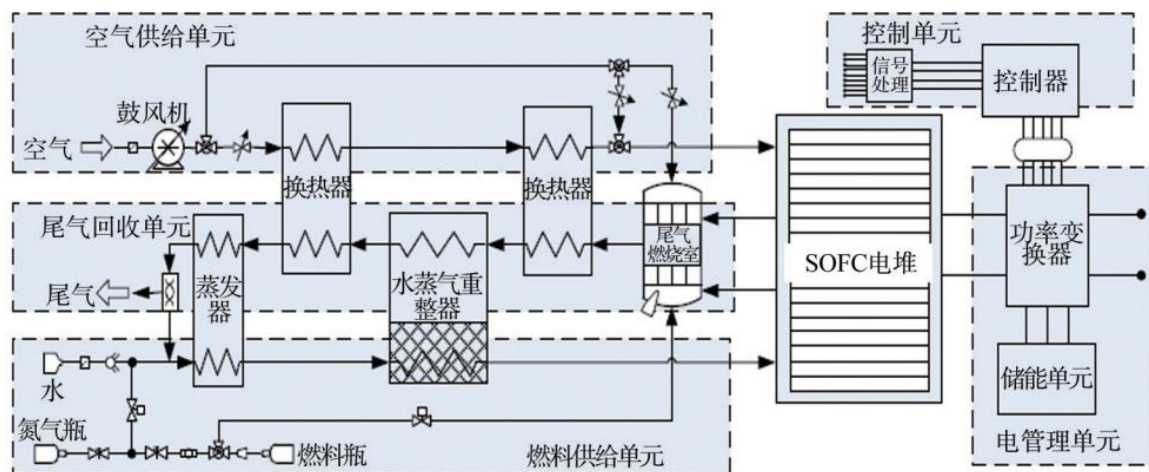
SOFC为高效、清洁、燃料灵活的发电装置

- **SOFC（固体氧化物燃料电池）本质为将化学能直接转化为电能：**以固体氧化物（陶瓷）作为电解质。通过在高温下（650~950℃）让燃料（H₂/CO/CH₄等）在阳极与阴极传导来的氧离子（O²⁻）发生电化学反应。
- **SOFC系统可分为分为电堆（Stack）和外围 BOP（Balance of Plant） 辅助单元：**1) 电堆为SOFC系统的核心，是SOFC化学反应发生室；2) 围绕着电堆的BOP有空气供给预热单元、燃料供给（重整）单元、尾气回收单元、电管理单元以及控制单元。
- **SOFC核心特点：高效、燃料来源丰富、运行安静、无需贵金属作催化剂、低排放、建设周期短。**

图：SOFC化学反应原理



图：SOFC系统示意图



SOFC为高效、清洁、燃料灵活的发电装置



- **燃料电池间对比：**SOFC较PEMFC在**发电效率、负荷、燃料依赖性、运营成本**上有显著优势，但在**装机灵活性和启动时间**上弱于PEMC。
- **与燃气发电对比：**SOFC较燃气发电在**发电效率、负荷、燃料依赖性、环保性**上有显著优势，但在**装机灵活性**上弱于燃气发电，同时仍需要降本以实现经济性。

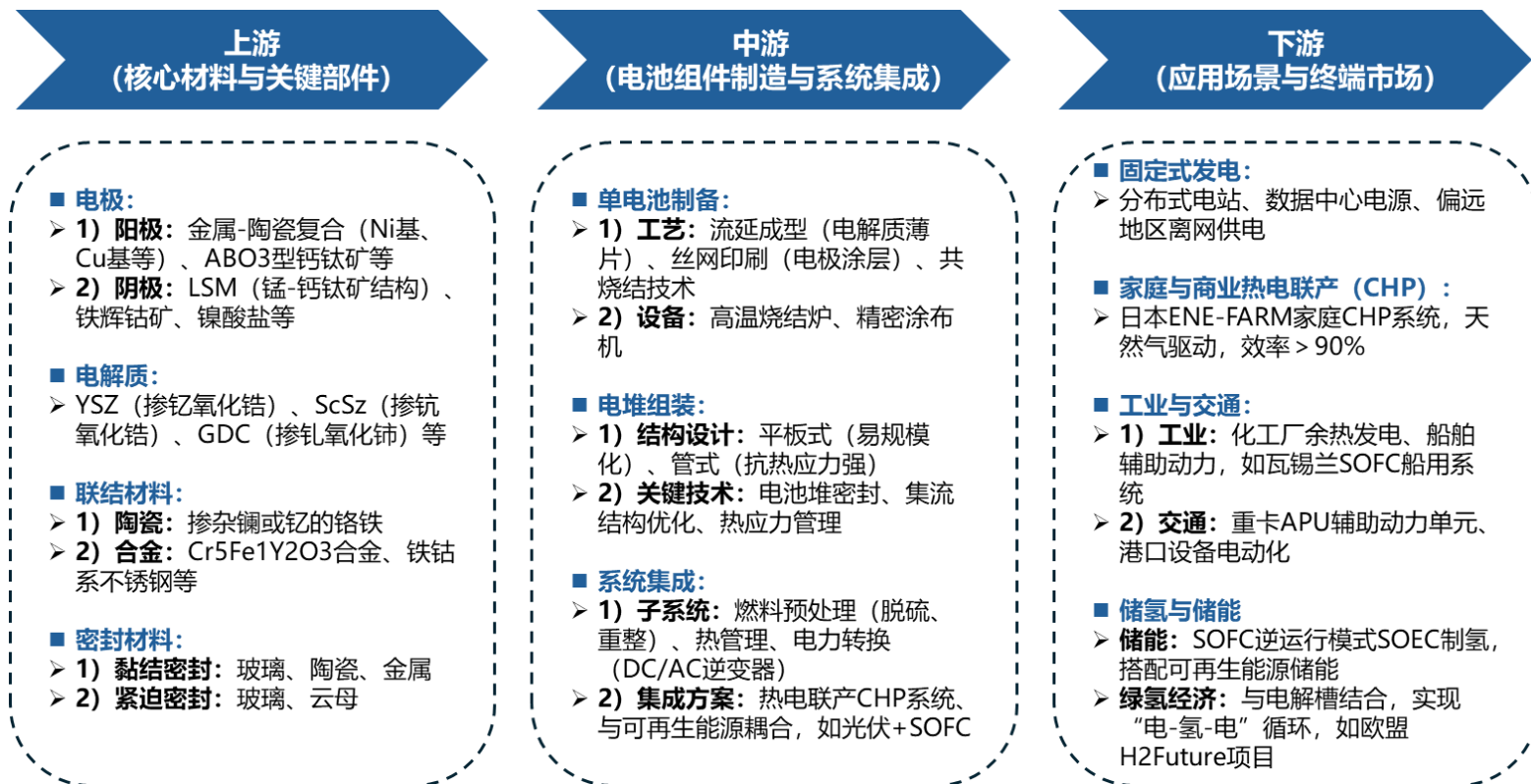
图：SOFC与燃气发电、PEMFC电池性能对比

维度	SOFC (固体氧化物燃料电池)	燃气发电	PEMFC 质子交换膜燃料电池
发电效率	50%-60% 高温运行，可结合热电联产提升效率，可达90% 以上	35%-55% 简单循环效率约 35%，联合循环可达50%-55%	40%-60% 低负载下效率下降较少，适合动态工况
环保性	接近零排放 主要产物为水，若使用天然气需要脱硫处理，CO2排放量低于燃气发电	高碳排放 (约 400-500g CO ₂ /kWh)，含 NO _x 、SO _x 等污染物，依赖尾气处理技术	零碳排放 仅排放水，若使用灰氢则上游有碳排放
部分负荷特性	优异 效率在 30%-100% 负荷范围内波动较小	较差 低负荷时效率显著下降，联合循环需维持最低负荷	良好 效率随负荷略有下降，但优于传统燃气发电
热备调峰启动时间	慢 冷启动需数小时，高温运行需预热；热备用下启动约 10-30 分钟	较慢 联合循环冷启动需 30 分钟~2 小时；简单循环约 10-30 分钟	极快 冷启动仅需秒级至分钟级，适合频繁启停
装机灵活性	中等 模块化设计，单机规模从 kW 到 MW 级，但高温系统需保温材料	低 依赖集中式大型机组，最小规模通常为数十 MW	高 高度模块化，单堆功率可低至 kW 级，易扩展
燃料依赖性	高灵活性：可用天然气、沼气、氢气、合成气，需重整处理	单一依赖：主要依赖天然气或柴油，需稳定化石燃料供应	严格依赖：需高纯度氢气，对杂质敏感，需配套制氢或储氢设施
成本与经济性	初始成本高（高温材料、系统复杂），运营成本低（高效燃料利用、热电联产收益高）	初始成本中低（技术成熟），但燃料成本占比高（受天然气价格波动影响）	初始成本高（催化剂、膜电极昂贵），燃料成本依赖氢价（绿氢成本仍较高）
应用场景	分布式发电（工厂、数据中心）、热电联产（CHP）、偏远地区供电	电网基荷或调峰电源、大型工业供电	交通领域（汽车、无人机）、便携电源、小型分布式电源（如通信基站）

SOFC产业链划分

- **上游主要为原材料，直接决定电池性能和成本。**从结构上看可将其划分为电极/电解质/联结/密封等4类。
- **中游为核心制造环节，包括电池制备与系统集成，核心是电堆组装。**核心厂商有BE、Ceres Power等。
- **下游为核心应用场景，主要为发电和制氢两大类，其中发电为核心，较为成熟的领域有家庭CHP系统、重卡APU和船舶动力系统。**据Fortune Business Insight测算，2024年SOFC终端应用中，50.43%用于商业领域（供暖供热等），约40%用于数据中心电源。

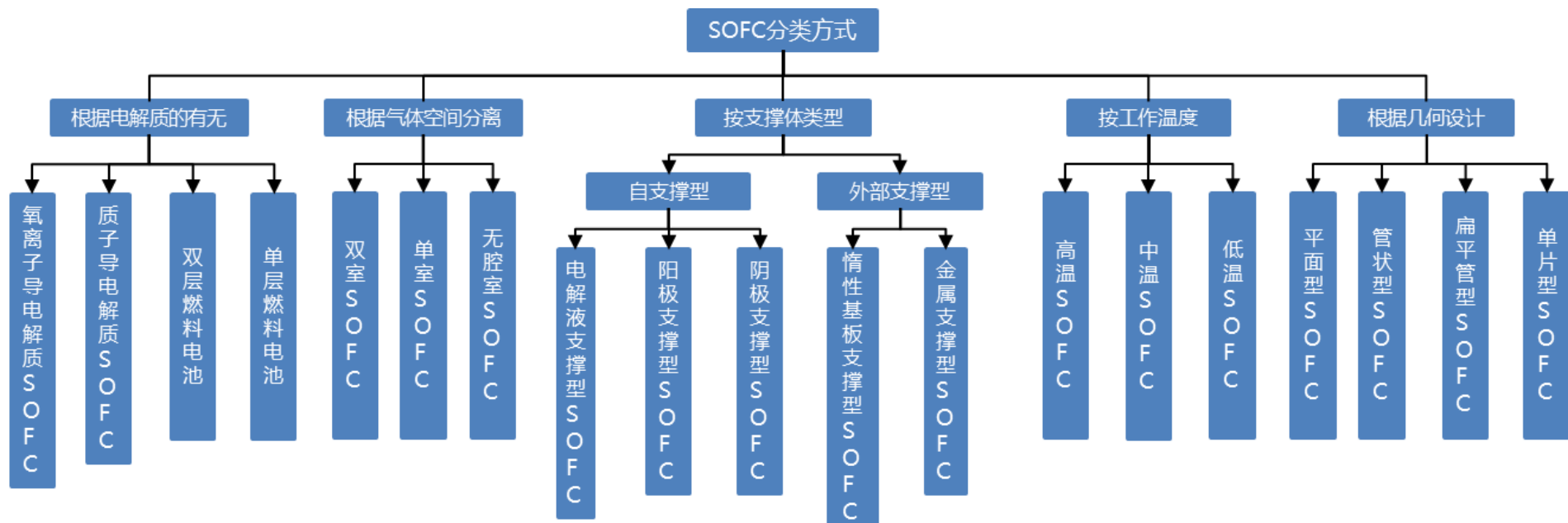
表：SOFC产业链



SOFC分类方式

- **SOFC的分类通常涉及五个维度：**电解质的有无、气体空间的分离方式、工作温度、支撑体类型、几何设计。
- **核心分类逻辑：**1) **电解质：**作为离子传输的重要载体，影响SOFC的运行温度和电化学效率；2) **气体空间的分离方式：**是否用物理屏障将反应物分离直接影响SOFC的密封需求和对电极催化选择性的依赖；3) **工作温度：**温度分布影响单电池/电堆性能，也是导致SOFC电堆内各部件产生热应力的关键所在；4) **支撑体：**为SOFC核心组成部件，影响电池的机械强度、组装工艺和电化学性能；5) **几何设计：**根据阳极燃料和阴极空气的不同供给模式区分。

表：SOFC分类方式



SOFC按支撑体类型可划分为三大类

- **SOFC按支撑结构划分可分为电解质支撑型、电极（阴极/阳极）支撑型、金属支撑型三大类：**
 - **电解质支撑型具有结构稳定性高、输出性能稳定的优点：**用较厚的电解质层来换取支撑体的机械强度，但增加了欧姆阻抗和极化阻抗进而导致电池性能下降，代表企业有BE。
 - **电极支撑型在电解质薄膜化的基础上保证较高的电化活性：**阳极支撑体主要是金属基复合陶瓷材料，负极支撑体主要是锰酸锶镧（LSM）等，代表企业有Delphi、西门子-西屋等。
 - **金属支撑型具有启动快、成本低等特点：**使用廉价、坚固、易于加工的多孔金属作为支撑体如Fe基合金和Ni基合金，代表企业有潍柴动力、Ceres Power等。

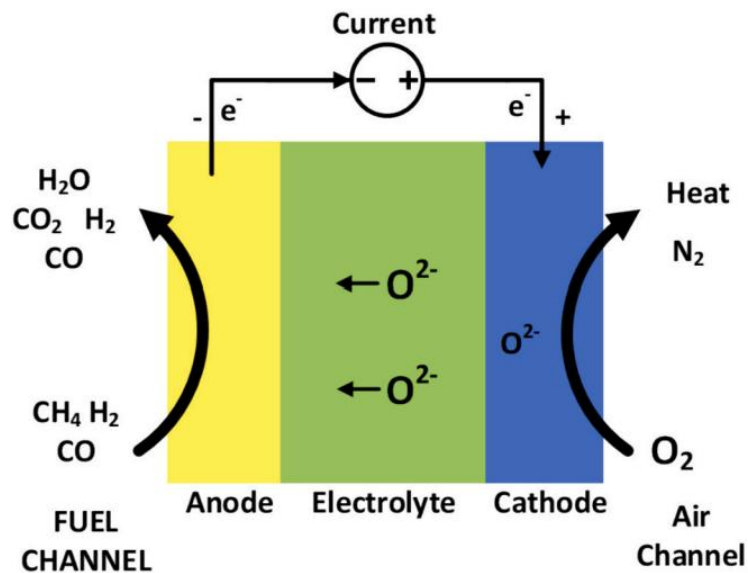
表：各类型支撑体SOFC的对比

类型	电解质支撑型 (ES-SOFC)	阳极支撑型 (AS-SOFC)	阴极支撑型 (CS-SOFC)	金属支撑型 (MS-SOFC)
优点	电解质致密 电化稳定 制备工艺简单	欧姆阻抗小 输出功率高 降低运行温度 材料适配性好	燃料选择性高 电池结构稳定性好	金属材料成本低 欧姆阻抗小 电池启动快 易于加工和密封
缺点	欧姆极化明显 电导率低 运行温度高 材料寿命短	抗热循环性差 抗氧化还原性差 燃料选择性低	浓差极化大 电化稳定性差 阴极材料制备复杂 成本高	金属材料易氧化 电解质致密难度高 制备工艺复杂
结构示意	Cathode Electrolyte Support Anode	Cathode Electrolyte Anode Support	Cathode Support Electrolyte Anode	Cathode Electrolyte Anode Metal Support
代表公司	BE/IKTS/关西电力	Delphi/Full Cell Energy	西门子-西屋	潍柴动力/Ceres Power

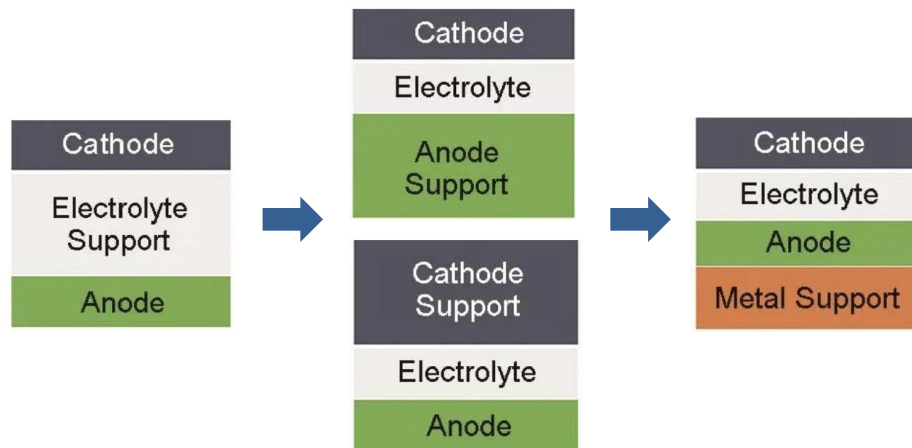
以支撑体形式看SOFC发展趋势

- **SOFC各环节作用：**1) 阳极与燃料接触，流出电子，电子通过外电路（发电）流至阴极；2) 阴极接收电子，与外部氧气反应产生氧离子；3) 电解质将阴极产生的氧离子传导至阳极，用于阳极氧化反应。
- **以支撑体类别看SOFC发展路径：**第一代以电解质为支撑体，第二代以电极为支撑体（阳极为主），第三代以金属为支撑体。
- 一代向二代发展的核心诉求是降低因厚电解质导致的高欧姆损失（本质为提效）；二代向三代发展的核心诉求为解决阳极氧化等痛点。同时，降本也为贯穿三代SOFC发展的核心诉求，通过切换支撑体材料和降低反应温度（提高寿命+增加材料选择空间）实现。

图：SOFC化学反应原理



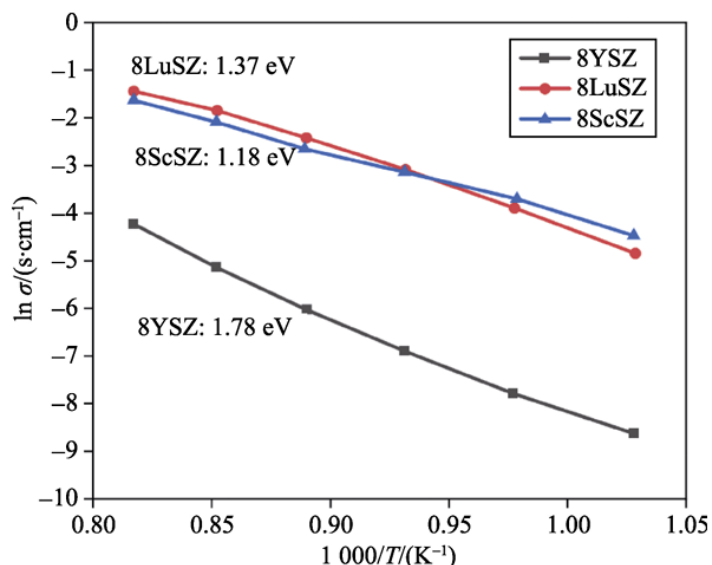
图：SOFC发展路径



电解质支撑型：成熟稳定但降本仍任重道远

- **特性：较厚的电解质层为SOFC提供机械强度，具备稳定、制备难度低等特点：**依靠100-300 μm 的厚电解质层作为电池的刚性支撑结构，为最早一代SOFC方案，是当前大规模商用SOFC的主流方案，市场龙头为BE。
- **痛点：高温运行使得材料选择苛刻+原材料成本较高：**1) 较厚的电解质层（100-300 μm ）使得氧离子传导阻力大，为保持较高的电解质电导率（提效），SOFC运行温度一般在900-1000 $^{\circ}\text{C}$ ，**大幅收窄了电堆乃至外围BOP的材料选择空间**；2) SOFC系统中的核心元件互连件（金属双极板）占电堆成本的5-10%左右，而高温运行下的互联件材料选择一般为铬酸钼陶瓷，成本约在7000元/公斤，**原材料成本较可在阳极/金属支撑体SOFC上应用的高温合金/碳素体不锈钢等更高。**

图：部分SOFC用电解质电导率随温度倒数的变化



表：不同SOFC运行温度下的互连件选择

运行温度	互连件材料	价格	支撑体类型
约1000 $^{\circ}\text{C}$	铬酸钼盐陶瓷	约7000元 / 公斤	电解质
800-900 $^{\circ}\text{C}$	高温合金 (Haynes 230)	约450-850元/公斤	-
<800 $^{\circ}\text{C}$	铁素体不锈钢	约7元/公斤	阳极+金属

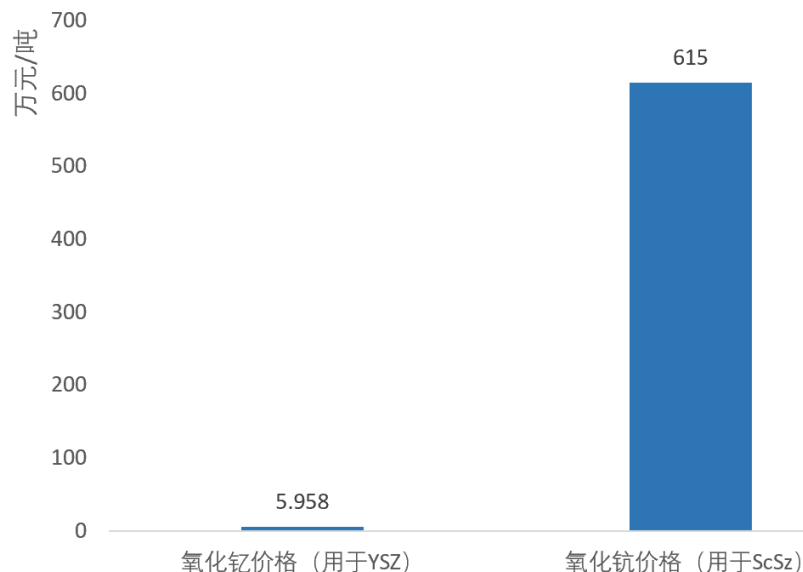
阳极支撑型：低温化放大降本空间



- **特性：低温化运行，电解质/连接体/BOP等核心环节材料选择空间增加。**其中，电解质厚度大幅减少，材料可用传统YSZ，无需为高电导率付费。YSZ所用氧化钇价格约为ScSZ所用氧化钪价格的1/100（实际成本差基于金属掺杂应用情境下为几十倍）。
- **痛点：阳极极化+常用材料易氧化&热膨胀问题影响电池结构进而造成不可逆损失：**1) 为实现与YSZ电解质共烧结的兼容度，常用阳极材料为Ni-YSZ，但在阳极厚度增加情况下，Ni氧化为NiO带来的体积膨胀+易积碳&硫中毒的劣势被放大，进而会对电池性能乃至结构造成不可逆影响；2) 积碳问题可通过选用Cu-CeO₂、钙钛矿等作为阳极材料来解决，但会出现共烧兼容性、电导率较低导致阳极极化损失大等问题。

图：氧化钇与氧化钪价格对比

（二者价格基于Wind数据库2026/5/22值，氧化钪价格为wind最低价与最高价均值）



表：电解质支撑SOFC与阳极支撑SOFC对比

维度	电解质支撑	阳极支撑
运行温度	近1000℃	700-800℃
电解质选择	8YSZ、ScSZ	8YSZ、ScSZ、GDC
电解质厚度	100-300μm	5-20μm
阳极材料	Ni-YSZ	Ni-YSZ、Cu-CeO ₂ 、钙钛矿
阴极材料	LSM	LSCF
配套/材料成本	高	中
核心痛点	欧姆极化损失大 电池运行温度高 材料选择空间小	Ni基阳极易积碳+硫中毒 Ni基阳极氧化还原稳定性差 存在热膨胀问题
核心优势	成熟，已大规模商用 机械结构稳定	工艺解决后成本更低

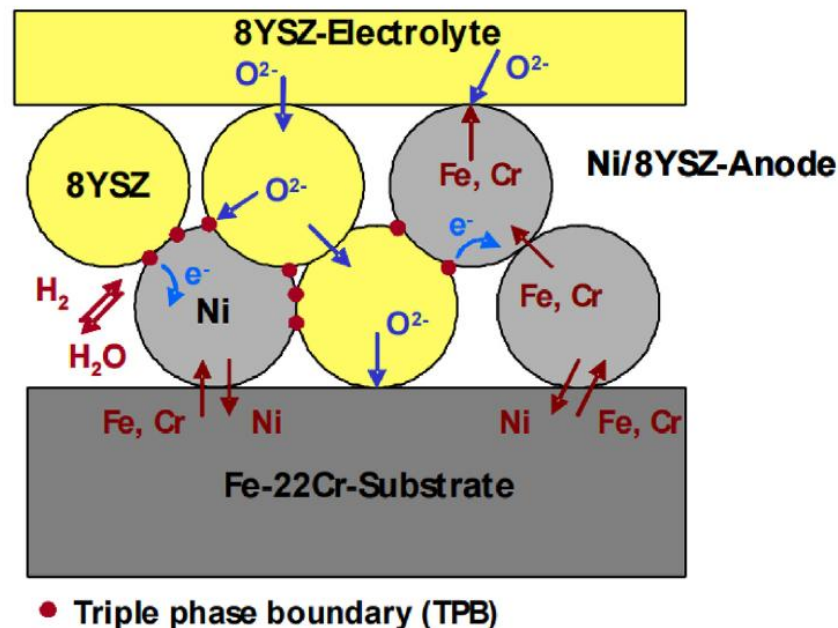
金属支撑型：三类方案温度最低，可快速启停

- **特性：工作温度为3种方案内最低，且解决阳极支撑热膨胀问题&具备快速启停的特性：**1) 以金属（一般为铁素体不锈钢）为刚性支撑体，进一步降低电解质厚度从而实现低温运行；2) 铁素体不锈钢或掺Cr的不锈钢热膨胀系数与电解质匹配；3) 金属如铁素体不锈钢热导率&韧性显著优于陶瓷，快速启停情境下仍能保持温度。
- **痛点：烧结环境苛刻+超薄电解质层制备困难，金属层元素易迁移造成电极中毒：**1) 不锈钢在高温下易氧化的特性使得烧结需要在还原气氛下进行，且低熔点特性需控制烧结温度；2) 在多孔金属支撑体上制备致密电解质层较电解质/阳极支撑SOFC更难；3) 高温烧结下，金属层的Fe/Cr/Ni等元素容易造成阳极中毒、界面反应和电催化活性衰减。

表：可用于金属支撑SOFC的各类合金材料特性

合金材料	热膨胀系数 (CTE, $10^{-6}/K$)	机械强度	加工性	成本
Cr 基合金	11.0~12.5	高	难	很高
铁素体不锈钢	11.5~14.0	低	较难	低
奥氏体不锈钢	18.0~20.0	较高	易	低
Fe 基超合金	15.0~20.0	高	易	较低
Ni 基超合金	14.0~19.0	高	易	高
纯 Ni	16.0~17.0	低	易	高
Ni-Fe 合金	13.0~14.0	低	易	较高

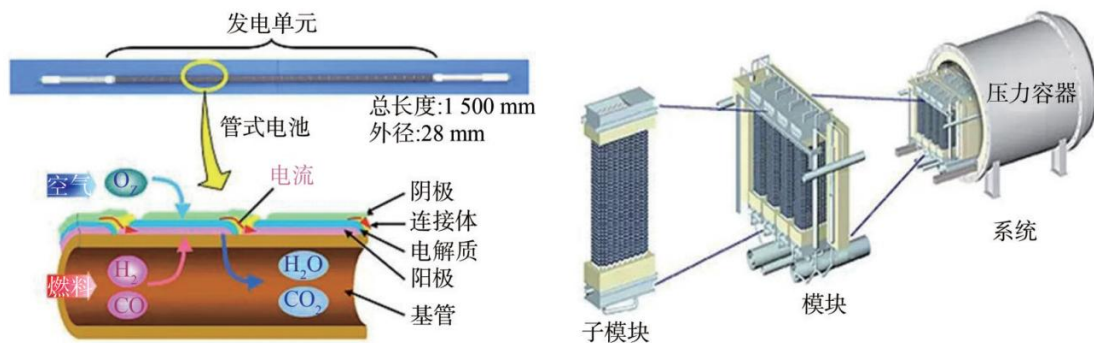
图：金属支撑元素扩散机制图



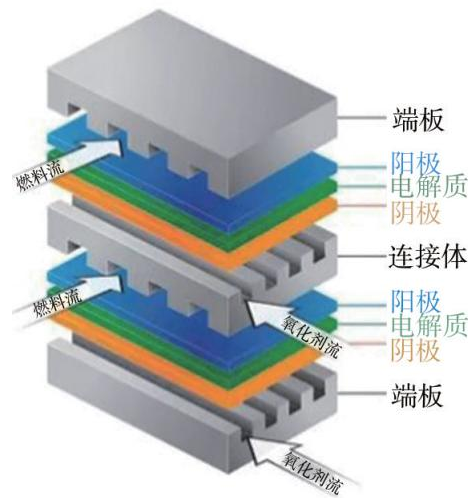
SOFC电池单元可分为管式和平板两类

- **SOFC的单元组件设计形式大体分为两类：管式结构和平板式结构。**管式设计由于良好的密封性能而具有长期运行稳定的特点，而平板式设计由于电流路径短而具有高的功率密度。
- **管式SOFC的单电池由一端封闭、一端开口的管子构成。**最内层为多孔支撑管，向外依次是阳极、电解质与阴极薄膜。其单体结构稳定不易开裂，陶瓷支撑体牢固，组装简便，可串并联组成大功率电池组。但电极间距大、电流路径长，内阻损耗高，功率密度偏低。
- **平板式结构SOFC的几何形状简单，由阳极、电解质、阴极薄膜组成单体电池。**两边带槽的连接体连接相邻阴极和阳极，并在两侧提供气体通道，隔开两种气体。其结构和制备工艺简单，制造成本低。但是电池组件边缘要求耐高温密封来隔离氧气和燃料气；双极连接板材料要求高。
- **行业主流为平板，代表厂商有BE、Delphi、Ceres Power等。**

图：管式SOFC结构示意图



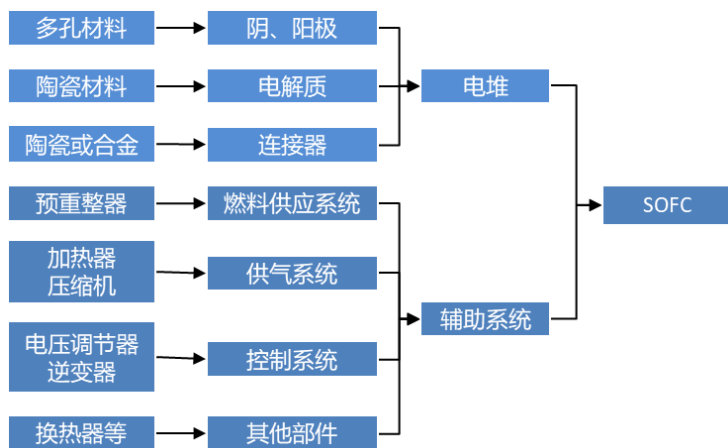
图：平板式SOFC结构示意图



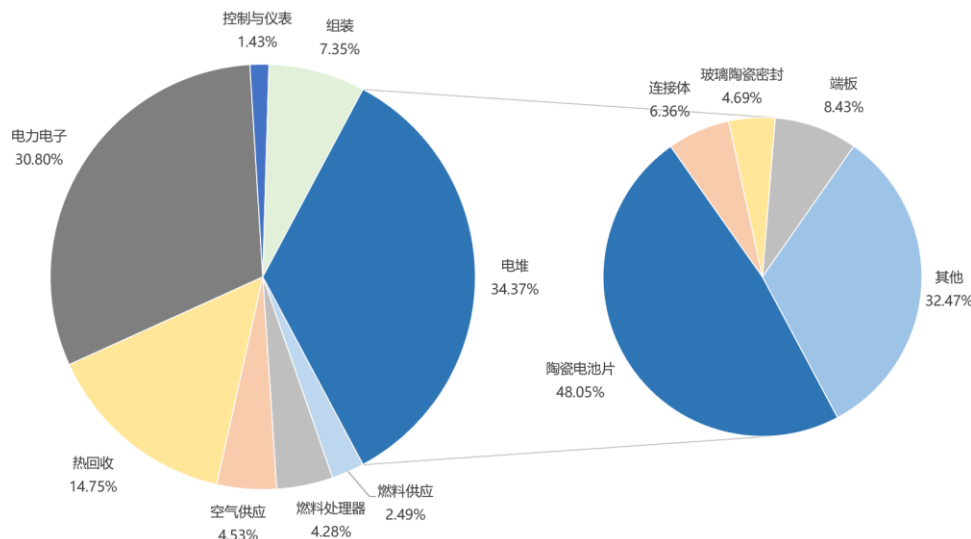
SOFC系统成本拆分

- SOFC系统可分为分为电堆和外围BOP辅助单元，因不同方案下各环节成本占比不同，以DOE2017年数据拆分：
 - 1) 电堆约占整个SOFC系统成本的34%左右（若去掉逆变器则可达40%以上），其中约48%为电池本体，连接体（金属双极板）/密封件/端板分别占比约6.4%/4.7%/8.4%；
 - 2) 外围BOP单元中成本占比较高的电力电子、热回收环节，分别占比30.80%/14.75%，其中混合逆变器占电力电子成本的75.7%、阴极换热器占热回收的82.6%，是主要成本项。

图：SOFC系统组成



图：250KW SOFC系统在30KW单电堆出货5万个情境下的成本拆分（DOE 2017年数据）



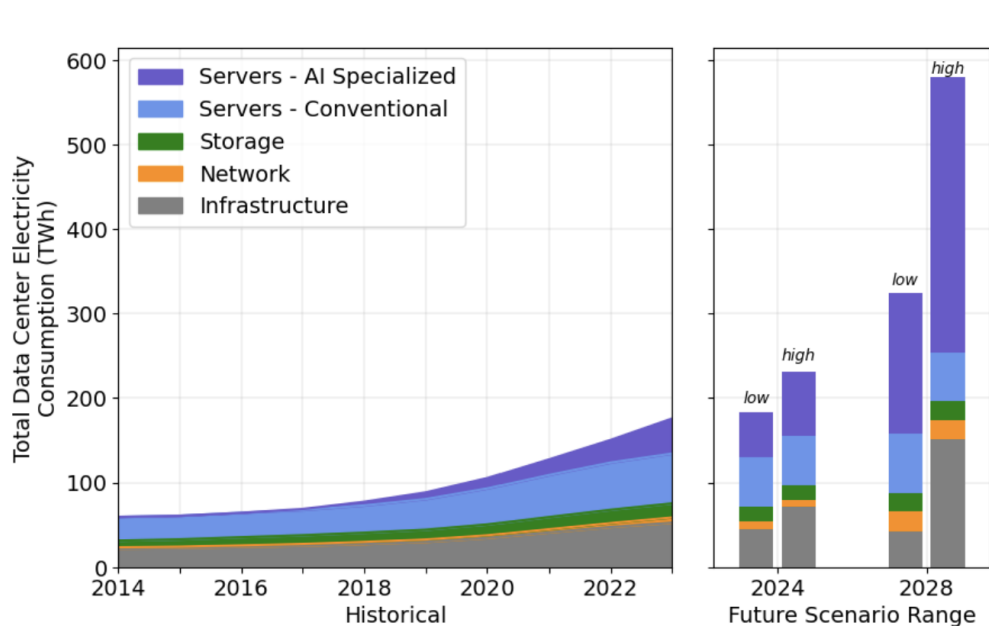
2. 北美缺电带动SOFC主电源逻辑上行

核心因素：AIDC基建潮加剧北美电力供求矛盾

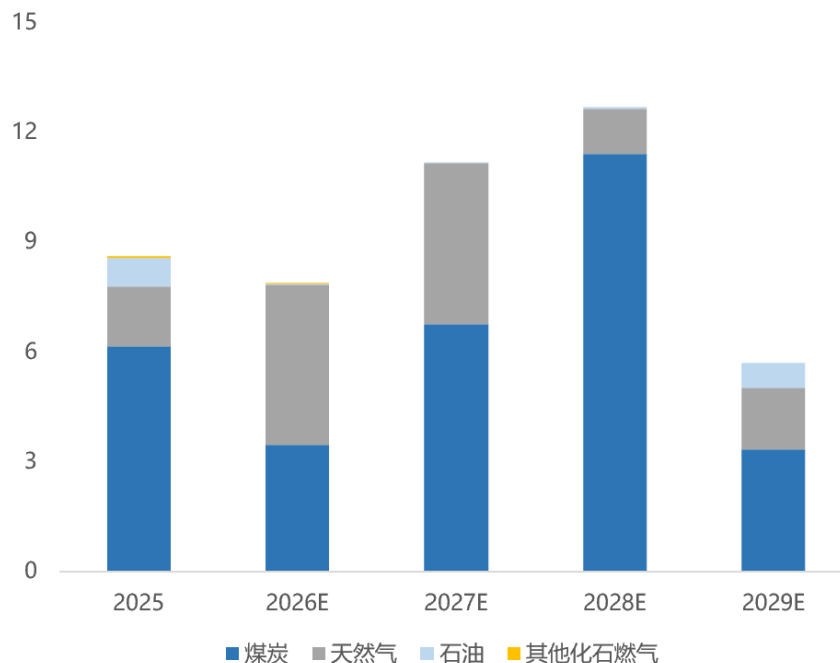


- **需求端：**美国劳伦斯伯克利国家实验室预测到2028年，数据中心用电量将激增至328~580TWh（23年为176TWh），约占美国电力总需求量的6.7%~12.0%（23年为4.4%），其中核心需求增量来源于AIDC；
- **供给端：**截至2024年，美国存量装机规模约为1300GW左右，近6年增长速度缓慢（2018-2024年CAGR约为1.7%）；且老旧火力发电机组退役速度正在加快。根据EIA规划，2025-2029年美国电力退役容量达46.5GW。

图：数据中心电力需求测算



图：美国发电机组退役容量 (TWh)

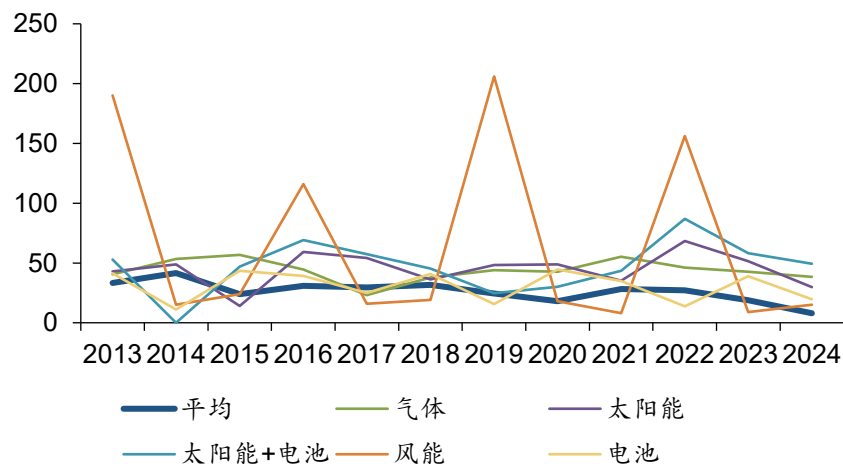


美国缺电现状：数据中心并网审批周期长

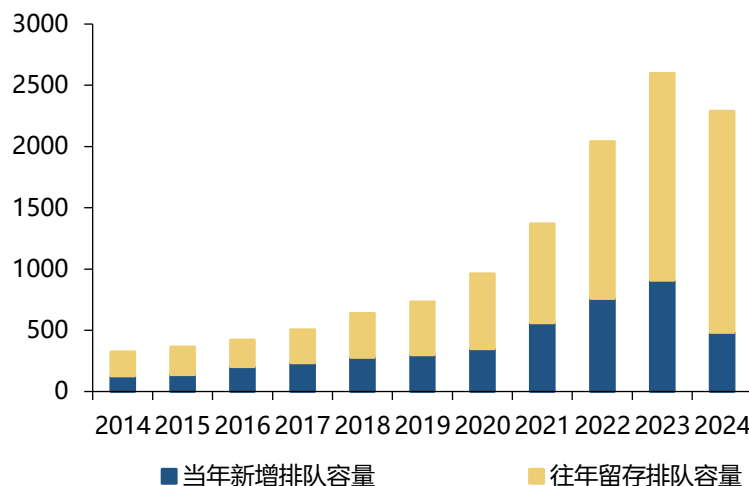


- **美国并网许可项目审核周期一年至五年不等，时间较长。**近年来美国发电项目并网审批平均等待时长约为18-30个月，等待周期较长。其中气体发电项目及太阳能+电池发电项目等候时间均超过三年。
- **美国电力项目累计待接入容量2020年后快速增加。**2019-2023美国新增排队容量增加3.67倍，总排队容量增加2.54倍。2024年新增排队容量略有下降，系申请周期时间较长导致。

图：美国并网许可项目审批周期（月）



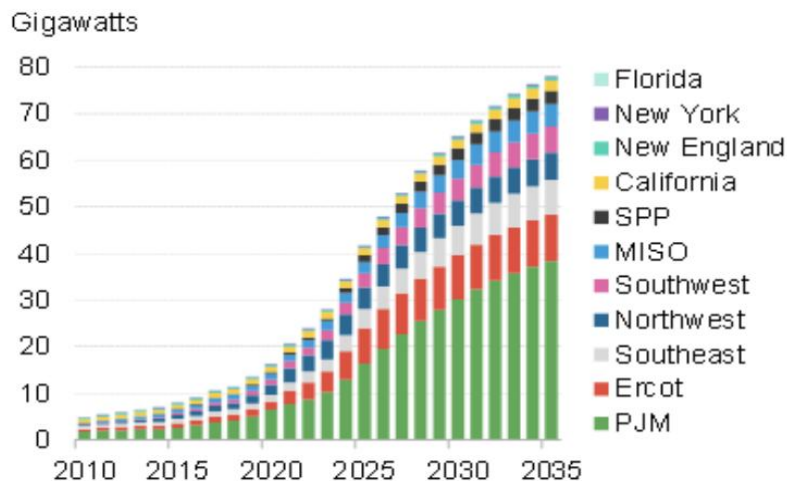
图：美国电力项目排队等待累计容量（GW）



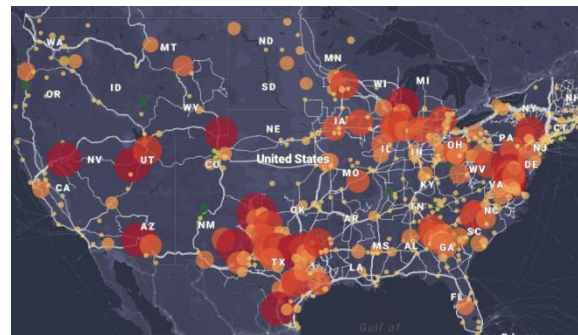
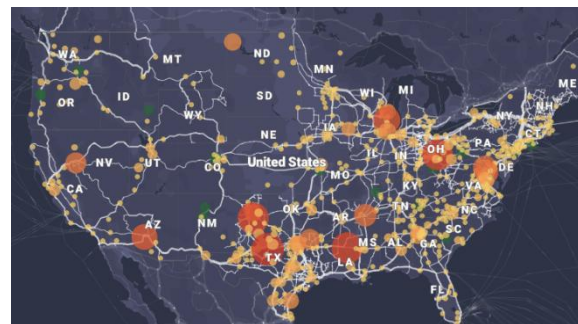
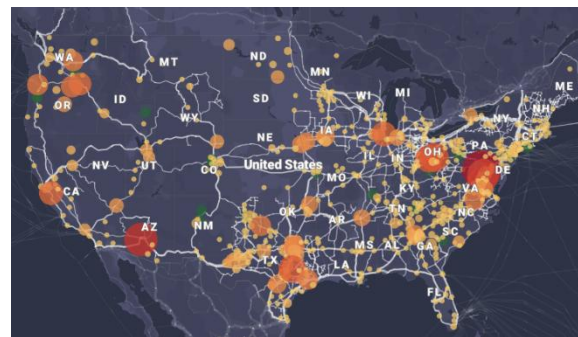
区域不平衡：数据中心集中在PJM/德州/加州等区域

- **PJM是美国目前最大的数据中心市场，德州、加州、东南部区域等亦为主要数据中心聚集地。**各州来看，2025年弗吉尼亚州数据中心占比最大，达到14.1%，德州次之，占比约10.1%。根据IEA，美国前5大AIDC集群占全国AIDC总容量的1/2。
- **数据中心的高度区域集中，使得局部电网压力远大于美国平均。**根据IEA，弗吉尼亚州AIDC用电占当地供电的25%，美国已有6个州AIDC用电占当地供电的10%以上。

图：美国数据中心用电需求地区分布（GW）
(2025年起为预测值，BloombergNEF预测)



图：美国在运-在建-规划数据中心分布情况
(2025年12月15日数据)



燃气轮机短缺加剧，内燃机+SOFC填补缺口



- 当前数据中心主电源方案考量的主要因素：交付及建设周期、LCOE、发电稳定性。
- 交付及建设周期：核电/并网/风电周期较长，重燃CCGT > 轻燃 > 内燃机/光伏 > SOFC；
LCOE：SOFC > 高速内燃机 > 重燃CCGT > 轻燃CCGT=中速内燃机 > 轻型燃气轮机 > 光伏；
发电稳定性：重燃 > 轻型燃气轮机/航改燃 > SOFC > 燃气内燃机 > 光伏。

图：现有主电源方案综合对比

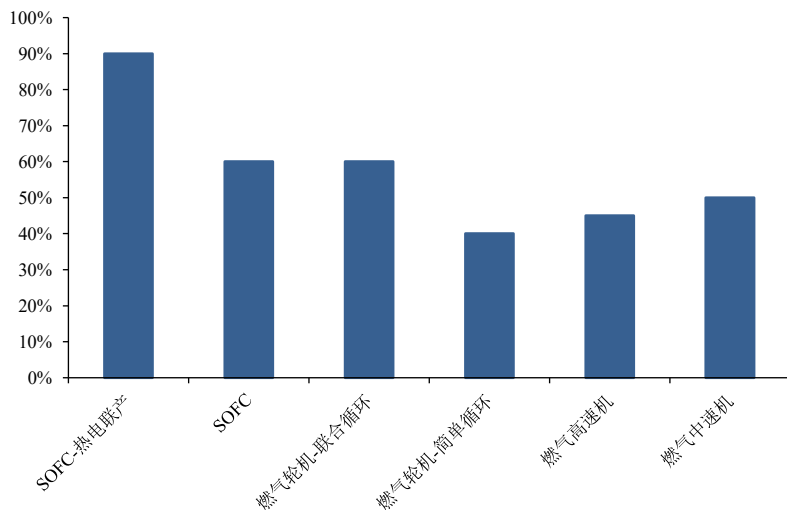
方案	类型	单机功率	发电效率	交货周期	建设周期	建设成本	LCOE	发电稳定性
燃气轮机	H级重燃联合循环	100-1000MW	50%-60%	36-60个月	2-4年	2000-2800\$/kw	0.15\$/kwh	极高
	轻型燃机联合循环	40-100MW	40%-55%	12-36个月	1-2年	1800-2500\$/kw	0.12\$/kwh	高
	轻型燃气轮机	5-50MW	35%-40%	12-36个月	1-2年	1000-1300\$/kw	0.09\$/kwh	高
	航改燃气轮机	30-60MW	35%-40%	18-36个月	1-2年	1500-1800\$/kw	0.105\$/kwh	高
内燃机	中速内燃机	5-20MW	45%-50%	15-24个月	1-2年	1700-2200\$/kw	0.12\$/kwh	高（低于燃气轮机）
	高速内燃机	1-5MW	40%-45%	15-24个月	1-2年	2200-2800\$/kw	0.16\$/kwh	较高（低于中速内燃机）
SOFC	SOFC	0.325MW	60%	3-4个月	0.5-2年	3000-4000\$/KW (降本后 900\$/KW)	0.27\$/kwh	高
	SOFC热电联供		90%	3-4个月			0.08\$/kwh	
核电	核电（新建）	/	33%-35%		5-15年	6000-15000\$/kw	0.06-0.11\$/kwh	高
	核电（重启）	/			2-5年	/		
新能源	光伏	/	15-22%		1-4年	/	较低	低
	风电	/	35-50%		2-7年	/	较低	低
电网	电网	/	/	3-7年		/	取决于电网电价	取决于电网稳定性（美国较低）

SOFC：核心优势为发电效率高、交付快

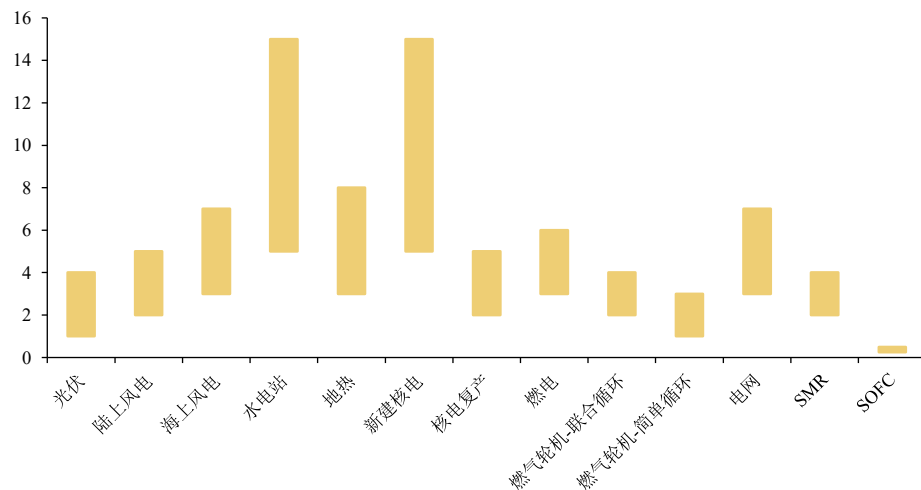


- **发电效率：**SOFC发电效率60%，热电联产发电效率高达90%，较燃气轮机、燃气内燃机具有明显优势。
- **建设周期：**当前SOFC为建设及部署周期最短方案，3-4个月可完成，Bloom Energy供电Oracle仅用55天，实现即装即用，而燃气轮机建设周期为1-4年，电网和其他发电方式建设周期更长。
- **冗余系数：**SOFC发电稳定性强、单个模块功率小，冗余系数低，一般为1.1，明显低于燃气轮机(1.3-1.8)。

图：不同发电方式发电效率对比



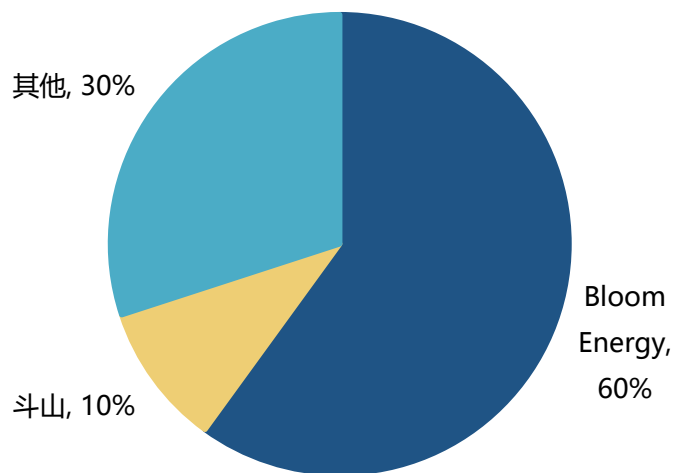
图：不同发电方式建设周期对比（年）



SOFC：市场格局集中，Bloom Energy占60%

- **市场格局：**全球SOFC主要分为几类玩家：**1) 商业SOFC量产厂商：**Bloom Energy为交付规模最大、商业化落地最成熟厂商，市场份额达60%-70%，此外斗山/三菱重工等也有工商业SOFC量产能力，斗山获得Ceres技术授权，于25年7月启动量产，年化产能50MW；**2) 住宅用SOFC：**日本厂商AISIN/Kyocera主要提供小型住宅热电联供SOFC，具备长期交付经验；**3) 技术研发及供应商：**Ceres Power专注于SOFC技术研发，并授权给斗山、台达、潍柴等生产厂商。

图：2023年SOFC市场格局



图：BE SOFC平台示意图



SOFC已具备一定经济性



- 燃气轮机涨价&OBBBA法案加码SOFC经济性：OBBBA法案对IRA法案进行修改，固定SOFC项目的ITC为30%，且取消零碳排放要求，该条款适用于2025/12/31后开始建设的SOFC项目，基于此情境下测算可得SOFC的LCOE约为0.066美元/kW，而燃气轮机LCOE因涨价已升至约0.050美元/kW，结合SOFC快速交付&发电稳定的优势，**SOFC已具备一定的经济性。**

表：燃气轮机与SOFC的LCOE测算

指标	燃气轮机 (近期涨价)	燃气轮机 (2023数据)	SOFC (补贴前)	SOFC (补贴后)	SOFC (DOE 2030E)
初始投资额 (美元 /kW)	2000	921	2944	2060.8	900
使用寿命 (年)	20	20	20	20	20
大修次数 (次)	1	1	4	4	4
单次大修成本占初始投资额的比例	20%	20%	35%	35%	35%
年度固定运维成本 (美元/kW)	33.68	15.51	88.32	88.32	27.00
加权平均资本成本 (WACC)	8%	8%	8%	8%	8%
残值	15%	15%	15%	15%	15%
总资本支出现值 (美元/kW)	2121	977	4353	3047	1331
年度资本成本 (美元/kW)	216.02	99.48	443.32	310.33	135.53
年度总固定成本 (美元/kW)	249.70	114.99	531.64	398.65	162.53
度电设备投资 (美元 /kWh)	0.031	0.014	0.066	0.050	0.020
天然气价格 (美元/MMBTU)	3.08	3.08	3.08	3.08	3.08
热耗率 (BTU/kWh)	6226	6226	5249	5249	5249
发电效率	55%	55%	65%	65%	65%
度电燃料成本 (美元 /kWh)	0.019	0.019	0.016	0.016	0.016
年利用小时数 (h)	8000	8000	8000	8000	8000
全生命周期度电成本 (美元 /kWh)	0.050	0.034	0.083	0.066	0.036

SOFC市场规模测算

- 以Bloom Energy订单测算可得SOFC单GW价值量大约在200亿元，当前SOFC处于从1-10，规模化效应下，BE及其余厂商预计开始降本，假设：1) AIDC用SOFC市场为主要增长源，参考FBI 2024年AIDC用SOFC份额数据，后续份额预计逐步提升；2) 2025年/2026年SOFC对应功率参考BE产能扩张进度；3) 自2026年开始价值量降幅为2%/年；4) SOFC渗透率基于对电网/燃气轮机/燃气内燃机份额测算，考虑到目前仅有BE完成大规模商业化，预计SOFC 2030年渗透率低于燃气轮机与燃气内燃机，但高于电网。
- 由此我们预测用于AIDC发电的SOFC市场规模如下：2026年为366亿元，2030年为3081亿元，CAGR为70.37%，2030年对应SOFC用于AIDC发电的渗透率为22%，对应功率约为17GW。

表：数据中心用SOFC市场规模测算

	2024E	2025E	2026E	2027E	2028E	2029E	2030E
海外算力卡总功率 (GW)	5.3	9.7	17.3	33.4	42.2	56.5	64.6
PUE	1.50	1.50	1.35	1.30	1.25	1.20	1.20
海外AIDC总功率 (GW)	7.95	14.55	23.3	43.4	52.7	67.7	77.5
SOFC渗透率	3%	6%	8%	12%	15%	20%	22%
SOFC对应功率 (GW)	0.24	0.87	1.87	5.20	7.91	13.55	17.04
其他发电类型 (GW)	0.08	0.15	0.47	1.30	1.58	2.03	2.32
SOFC价值量 (亿元/GW)	200	200	196	192	188	184	181
SOFC AIDC市场规模 (亿元)	48	175	366	1000	1489	2499	3081
AIDC用SOFC市场份额	40%	42%	46%	54%	58%	60%	62%
SOFC市场总规模 (亿元)	119	416	795	1851	2567	4165	4969

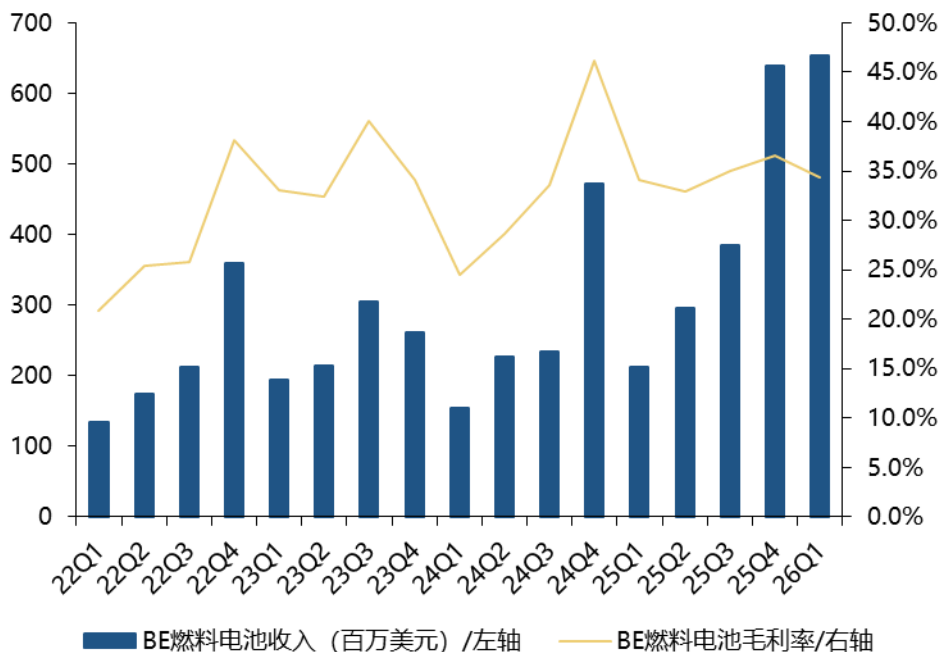
3. 产业进展加速，BE屡获大单

Bloom Energy: 26Q1销量创新高

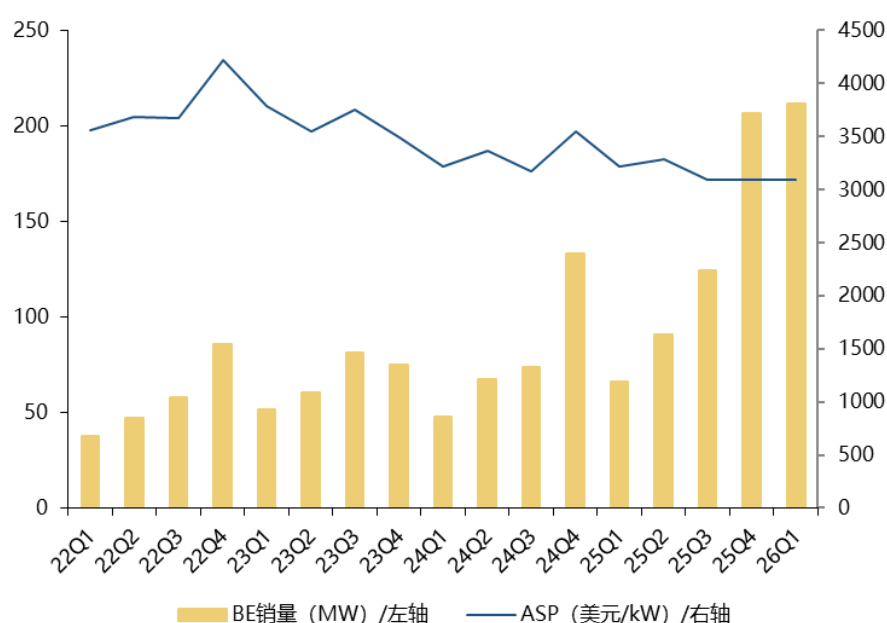


- **收入利润**: 2025年BE燃料电池销售收入15.3亿美元，同比+41%，毛利率35.2%。26Q1燃料电池销售收入6.5亿美元，同比+208.4%，创单季度新高。
- **销量及ASP**: 2025年BE燃料电池销售均价3143美元/KW，售价持续小幅下降，全年销售487MW，同比+51%，其中25Q4销售207MW，同比+55.2%；26Q1销售211MW，同比+220.4%；截至2026年初，BE已在全球1200+安装点累计部署1.5GW。
- **2026指引**: 将2026年全年收入增长指引同比提高至约+80%，高于此前的约+60%。
- **产能**: 公司于25Q4业绩会上表示26年底产能将从先前的1GW扩充至2GW。

图：BE燃料电池收入及毛利率



图：BE燃料电池销量及ASP



Bloom Energy：多元合作方订单不断落地



- **2024年起美国AIDC订单不断落地。** **2024年之前：** BE订单多为小规模订单，主要客户为韩国SK集团、三星重工等，为满足韩国政府的清洁氢能强制指标采购BE设备； **2024年及以后：** BE陆续落地大额供电订单，合作方包括AEP（公用事业企业）、Brookfield（基础设施投资管理公司）、Equinix（EPC）、甲骨文（云厂商）、Nebius（云厂商）等多种类型头部厂商，BE与美国公用事业公司从竞争对手变为解决电网问题的合作伙伴。 **往后展望：** 空气许可文件显示德州离网数据中心计划使用1.5GW BE设备，BE的快速交付能力使其有望在META、GOOGLE等头部云厂商继续拿下新大单。

表：2024年至今BE已签/潜在发电项目梳理

公告时间	客户/合作伙伴	订单/合作内容
尚未公告	德州离网数据中心	25年12月空气许可文件显示，Hedgehog USA申报的德州离网数据中心计划使用4615台BE发电单元，对应1.5GW
2026年5月	Nebius	与Nebius签署容量购电协议，BE将为Nebius分三期提供250MW保障容量和328MW装机容量，Nebius将采购SOFC系统发出的电力，未来10年总计支付金额26亿美金
2026年4月	甲骨文	甲骨文Jupiter项目计划用BE的SOFC替代原先计划采用的燃气轮机与柴油发电机，最高可达2.45GW
2026年4月	甲骨文	扩大与Bloom Energy合作，计划采购2.8GW SOFC燃料电池，首期签约1.2GW
2026年1月	AEP (美国电力公司)	基于2024年签订的1GW框架协议，行使采购协议的900MW（约26.5亿美元）
2025年10月	Brookfield战略合作	AI基础设施战略合作，最高投资50亿美元用于部署BE燃料电池
2025年7月	甲骨文	未披露规模，承诺90天内实现部署（实际55天）
2025年2月	Equinix	长期扩容合作（合作总规模超过100MW，75MW已投运，30MW在建）
2024年11月	AEP (美国电力公司)	签订1GW框架协议，首期采购100MW
2024年6月	CoreWeave	未披露规模，为CoreWeave位于伊利诺伊州的现代高性能数据中心供电
2024年5月	Quanta Computer (广达电脑)	未披露规模，为其位于加州的AI制造工厂提供燃料电池微电网
2024年4月	Intel (英特尔)	为加州圣克拉拉现有的高性能计算数据中心安装额外的MW级别SOFC，该设施将成为硅谷最大的燃料电池驱动高性能计算数据中心

SOFC产业链梳理

表：SOFC相关企业梳理

公司	环节	是否为BE链	进度
潍柴动力	SOFC系统整机	-	获Ceres Power技术授权，公司预计2026年底有批量产能落地
三环集团	隔膜片	是	公司与BE建立长期合作，是其SOFC隔膜片主要供应商
	SOFC系统整机	-	已落地百千瓦级SOFC系统，交流发电净效率达60%以上，热电联供可达90%以上
德昌电机控股	连接体	是	公司世特科粉末金属业务部门为BE提供关键组件
壹石通	SOFC系统整机	-	计划落地120kW SOFC系统，截至2026.4，已落地8kW
振华股份	金属铬（连接体）	-	已与BE供应链上多家金属连接件厂商进行了接洽或直接合作，公司预计对其铬材料的供应将通过中游的器件厂商间接实现
壹连科技	电连接组件	是	AIDC电连接组件已获BE大批量定点
京泉华	磁性器件	是	为BE提供磁性器件相关配套产品
春晖智控	温度传感器	是	拟收购的参股公司（收购后为全资子公司）春晖仪表为BE温度传感器供应商

三环集团：SOFC已实现百千瓦级部署

- 三环集团全资子公司深圳三环成立于2003年，已布局隔膜片、阳极支撑SOFC电堆等相关产品，为BE隔膜片供应商：
 - 2021年成功开发了35kW SOFC热电联供系统，并于2023年1月交付国内首个百千瓦级SOFC发电项目，交流发电净效率可达64.1%，热电联供效率可达91.2%。
 - 2023年10月，公司进一步迭代开发50kW SOFC热电联供系统，体积和重量不变、功率增加30%，初始发电效率达到65%，热电联供效率达到90%以上。
 - 截至2023年1月13日，公司已在深圳研究院SOFC系统研发中心同步安装了3套35kW共105kW的发电系统，园区内并网发电，自发自用。

图：深圳三环 SOFC相关产品

表：深圳三环国内首个百千瓦级SOFC发电项目参数



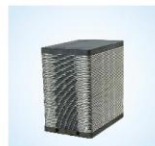
固体氧化物燃料电池电解质隔膜片

产品是平板式SOFC单电池的核心部件，它起到传递氧离子、阻隔电子，同时将燃料气和氧化气隔离的双重作用，是决定SOFC电堆性能和可靠性的关键因素之一



阳极支撑SOFC单电池

产品是SOFC电堆的核心组成单元，通常为阳极（燃料极）、电解质隔膜、阴极（氧化极）的“三明治”结构，和金属连接体依次叠放组成阳极支撑平板式SOFC电堆，这是目前主流的SOFC电堆技术路线



SOFC电堆

产品是SOFC系统发电的核心单元。高温电化学反应的场所，输入燃料气和氧化气后，高效、稳定地输出清洁电力和高品位余热



10kW SOFC电堆模组

产品是多个SOFC电堆的集成，实现功率放大的模块，提高SOFC系统的集成度

指标	具体参数
总装机容量	210kW
单系统容量	35kW
能耗	5.61MJ/kWh
交流发电净效率	64.10%
热点联供效率	91.20%
排放情况	无氮氧化物等尾气排放

德昌电机控股：世特科连接体已进入SOFC头部厂商供应链



- 公司于2015年收购世特科国际，并控制汉拿世特科30%股权，此后于2017年-2022年陆续收购汉拿世特科剩余70%股权。
- 世特科目前为公司粉末金属业务部门，其产品包括用于SOFC的连接体，已进入全球领先的SOFC能源解决方案供应链。
- **主业稳健+新兴产业布局前瞻**：公司在新兴产业的布局涵盖人形机器人、液冷、SOFC，2025-2026财年收入248.91亿元，实现净利润13.78亿元。

表：世特科收购时间线

时间	细则
2015年	以6.59亿美元收购世特科国际，并控制汉拿世特科30%股权
2017年5月	完成汉拿世特科50%股权，权益占比由30%升至80%，收购金额为8320万美元（939亿韩元）
2022年9月	完成汉拿世特科20%股权收购，汉拿世特科成为公司全资子公司，收购金额为5080万美元（703亿韩元）

壹石通：千瓦级系统已完成试运行



- **公司可实现SOFC从原材料到单电池、电池堆、发电系统的产业链关键环节自主可控：**1) **主业具备可迁移性：**公司主业深耕锂电涂覆材料、电子通信填充材料、低烟无卤阻燃材料；2) **前瞻布局SOFC：**公司2022年开始布局SOFC，投资2.03亿元建设技术研发中心，包括SOC（SOFC+SOEC）系统的研发与试制；3) **人才积累：**公司首席科学家为中科大材料系夏长荣教授，从事SOFC相关研究工作近30年。
- **产品为阳极支撑SOFC，首批千瓦级系统已完成试运行：**公司计划在怀远县壹石通碳中和产业园实施120kW SOFC系统的示范工程建设，截至2026年4月，已完成首套8kW SOFC系统的安装及试运行，发电效率可达60%以上，热电联供效率超过90%。
- **公司技术路线具备较大降本空间，其预计2026年有望实现单kW设备成本降至3 万元以下，2030年之前有望进一步大幅下降。**

图：壹石通发展历程



振华股份：SOFC连接体“卖铲人”

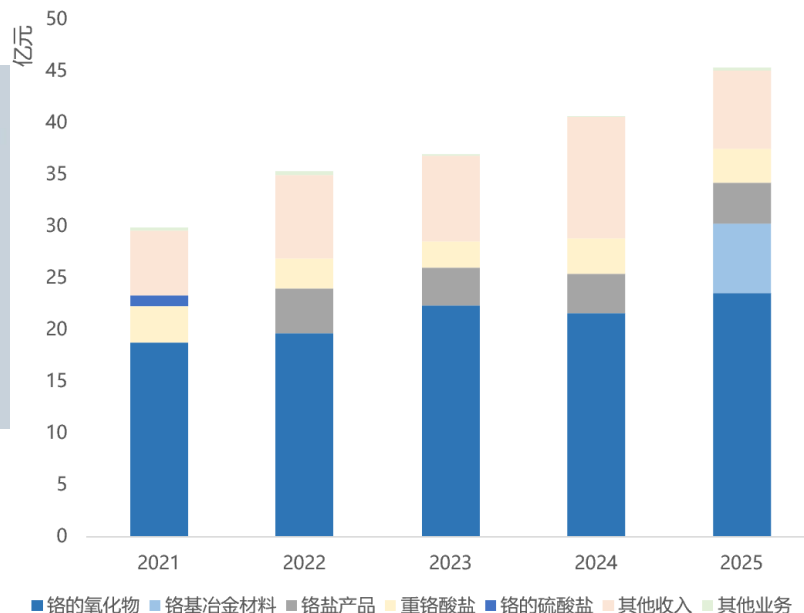
- 公司主要产品为各类铬盐，其中金属铬可用于SOFC连接体（铬含量95%的合金）制造，而铬绿可用于制造金属铬（生产1吨金属铬需消耗约1.73吨铬绿）。
- 拟发行可转债加码铬产能，SOFC相关业务拓展中：1) 公司拟发行可转债，募资8.78亿元，并将4.15亿元用于5,000吨/年维生素K3联产7.4万吨/年铬绿项目（总投资5亿元），通过实施募投项目，公司新增的冶金级铬绿产能对应金属铬产量为2.80万吨/年；2) 公司已与BE供应链上多家金属连接件厂商进行了接洽或直接合作，公司预计对其铬材料的供应将通过中游的器件厂商间接实现。

图：公司部分铬产品



氧化铬绿（左）和金属铬（右）

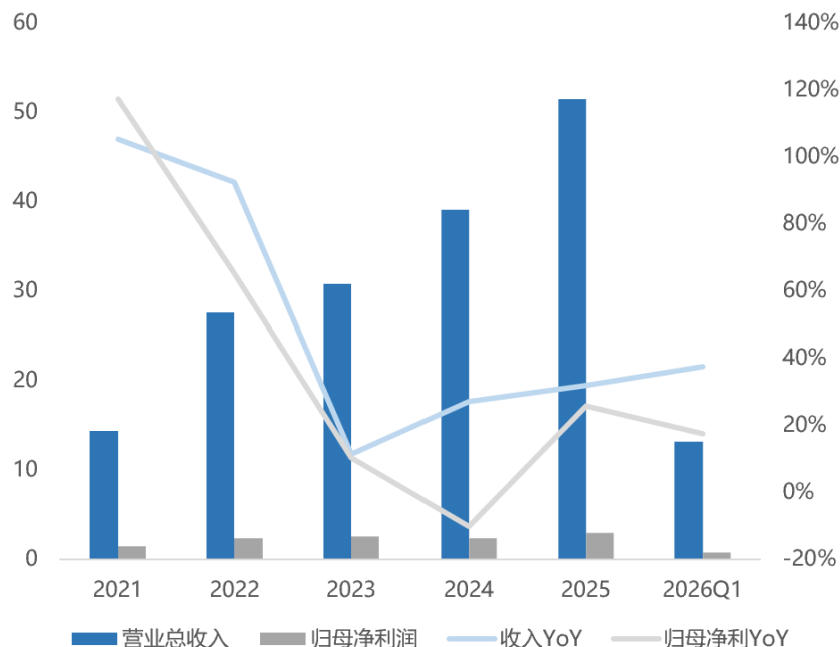
图：公司2021-2025年收入拆分



壹连科技：AIDC电连接组件已获BE大批量定点

- 公司主营产品可分为CCS电芯连接组件、动力传输组件、低压信号传输组件、FPC柔性线路板。
- 业绩：1) 2025年营收达51.49亿元，同比+31.85%；归母净利润为2.93亿元，同比+25.88%；2) 26Q1营收达13.16亿元，同比+37.37%；归母净利润为0.71亿元，同比+17.45%。
- 公司2025年12月公开表示AIDC电连接组件已获BE大批量定点，其余客户正在持续开发中。

图：公司营收&归母净利及YoY情况（亿元）



图：潍柴与Ceres合作历程梳理

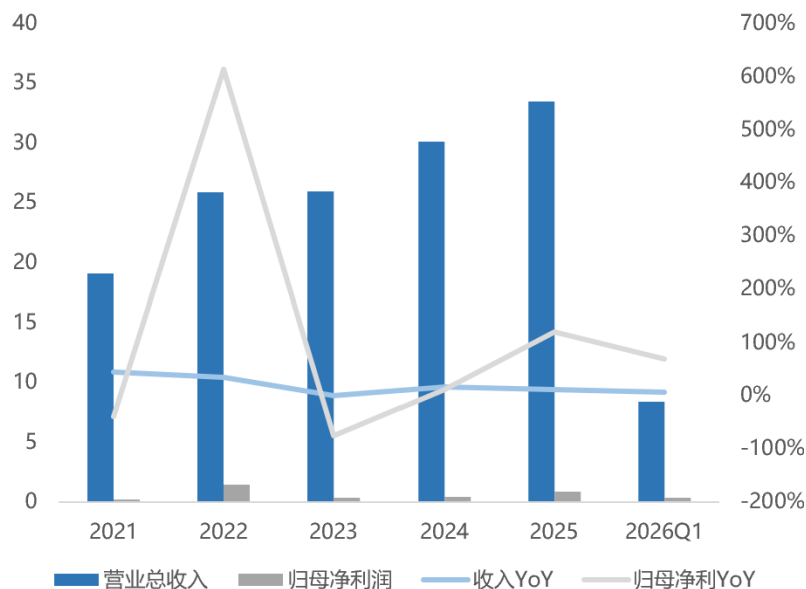


京泉华：BE磁性元器件供应商



- **公司主营产品可分为磁性元器件、电源产品、车载磁性器件三大类**，产品应用于新能源发电及储能、新能源汽车及充电桩、工业自动化、算力中心、通信应用及消费电子等多个关键领域。
- **业绩：**1) 2025年营收达33.47亿元，同比+11.14%；归母净利润为0.84亿元，同比+120.34%；2) 26Q1营收达8.42亿元，同比+6.11%；归母净利润为0.31亿元，同比+69.22%。
- **公司目前为BE提供磁性器件相关配套产品。**

图：公司营收&归母净利及YoY情况（亿元）



图：公司磁性元器件产品图



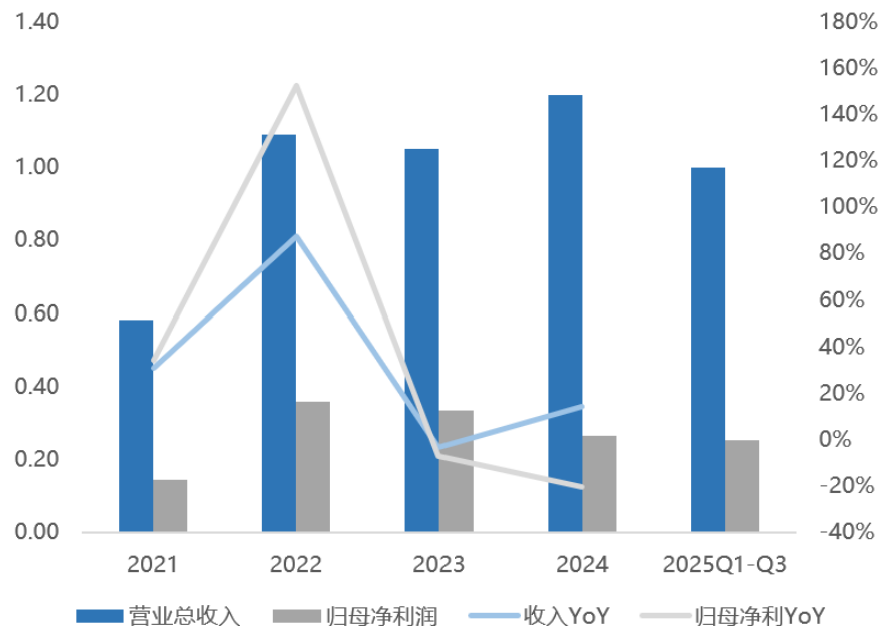
春晖智控：BE温度传感器供应商

- **拟收购春晖仪表**：公司拟以发行股份及支付现金购买资产的方式购买参股公司春晖仪表61.3106%股份，交易价格为2.575亿元。交易完成后，公司将持有春晖仪表100%股份。
- **春晖仪表主营产品为加热器、铠装热电偶、铠装热电阻等，2025Q1-Q3收入1.0亿元，归母净利为0.25亿元。** 2025-2027年业绩承诺为实现净利润不低于0.32/0.35/0.38亿元。
- **客户涵盖头部SOFC厂商。** 春晖仪表在SOFC领域主要提供温度传感器，海外客户涵盖BE，国内客户包括潍柴动力、三环集团等。

图：春晖仪表产品



图：春晖仪表营收&归母净利（亿元）及YoY



4. 投资建议与风险提示

潍柴动力：Ceres授权生产商，产能持续扩张



- 2018年，潍柴收购Ceres 19.9%股权。25年11月5日，Ceres公告与潍柴签订生产许可授权，Ceres其他制造合作方包括韩国斗山、台达。
- 产能：当前潍柴产能正在建设中，公司预计2026年底有批量产能落地。
- 降本潜力：金属支撑路线降本潜力高，1) 反应温度低，热部件要求低；2) 金属支撑重量轻、体积功率密度更高，省电池片材料，3) 国内制造成本低。
- SOFC国内首选【潍柴动力】。

图：潍柴与Ceres合作公告

Nov 05, 2025

Weichai sign manufacturing licence for SOFC power

Ceres Power Holdings plc, a leading developer of clean energy technology, has signed a manufacturing licence agreement for the production of Ceres' proprietary solid oxide fuel cell (SOFC) technology with Weichai Power (Weichai), a global original equipment manufacturer (OEM) and power systems developer headquartered in Shandong, China.

Highlights of the announcement

- Builds upon a strong, existing commercial relationship with Weichai – Weichai will now manufacture cells and stacks for their stationary power systems. This agreement supersedes existing agreements with Weichai.
- Further expands Ceres global manufacturing partner portfolio to four.
- Significant revenue and cash generation – licence fees, milestones and royalties are consistent with previous Ceres manufacturing licensing agreements.

图：潍柴与Ceres合作历程梳理

时间	进展
2018年	与 Ceres 建立战略合作/股权投资
2023年	固定式 SOFC 系统开发推进
2024年	潍柴SOFC 系统获 TÜV SÜD CE 认证，产品已具备较强工程化属性
2024年12月	潍柴向中国首批客户交付最高 100kW 示范系统
2025年11月	签署 SOFC power 制造许可

风险提示



- **产能扩张不达预期。**若SOFC主机厂商产能扩产不达预期，则会影响全产业链相关业绩。
- **北美用电需求低于预期。**SOFC主要可用作北美AIDC发电的主电源，若北美用电需求低于预期则会使得SOFC产业应用节奏放缓。
- **地缘政治动荡风险。**当前SOFC市场商业化厂商主要为Bloom Energy，其部分零件需要进口，若地缘政治动荡加剧，则会影响相关产业进口难度加大，进而对产业造成不利影响。

免责声明

东吴证券股份有限公司经中国证券监督管理委员会批准，已具备证券投资咨询业务资格。

本研究报告仅供东吴证券股份有限公司（以下简称“本公司”）的客户使用。本公司不会因接收人收到本报告而视其为客户。在任何情况下，本报告中的信息或所表述的意见并不构成对任何人的投资建议，本公司及作者不对任何人因使用本报告中的内容所导致的任何后果负任何责任。任何形式的分享证券投资收益或者分担证券投资损失的书面或口头承诺均为无效。

在法律许可的情况下，东吴证券及其所属关联机构可能会持有报告中提到的公司所发行的证券并进行交易，还可能为这些公司提供投资银行服务或其他服务。

市场有风险，投资需谨慎。本报告是基于本公司分析师认为可靠且已公开的信息，本公司力求但不保证这些信息的准确性和完整性，也不保证文中观点或陈述不会发生任何变更，在不同时期，本公司可发出与本报告所载资料、意见及推测不一致的报告。

本报告的版权归本公司所有，未经书面许可，任何机构和个人不得以任何形式翻版、复制和发布。经授权刊载、转发本报告或者摘要的，应当注明出处为东吴证券研究所，并注明本报告发布人和发布日期，提示使用本报告的风险，且不得对本报告进行有悖原意的引用、删节和修改。未经授权或未按要求刊载、转发本报告的，应当承担相应的法律责任。本公司将保留向其追究法律责任的权利。

东吴证券投资评级标准

投资评级基于分析师对报告发布日后6至12个月内行业或公司回报潜力相对基准表现的预期（A股市场基准为沪深300指数，香港市场基准为恒生指数，美国市场基准为标普500指数，新三板基准指数为三板成指（针对协议转让标的）或三板做市指数（针对做市转让标的），北交所基准指数为北证50指数），具体如下：

公司投资评级：

买入：预期未来6个月个股涨跌幅相对基准在15%以上；

增持：预期未来6个月个股涨跌幅相对基准介于5%与15%之间；

中性：预期未来6个月个股涨跌幅相对基准介于-5%与5%之间；

减持：预期未来6个月个股涨跌幅相对基准介于-15%与-5%之间；

卖出：预期未来6个月个股涨跌幅相对基准在-15%以下。

行业投资评级：

增持：预期未来6个月内，行业指数相对强于基准5%以上；

中性：预期未来6个月内，行业指数相对基准-5%与5%；

减持：预期未来6个月内，行业指数相对弱于基准5%以上。

我们在此提醒您，不同证券研究机构采用不同的评级术语及评级标准。我们采用的是相对评级体系，表示投资的相对比重建议。投资者买入或者卖出证券的决定应当充分考虑自身特定状况，如具体投资目的、财务状况以及特定需求等，并完整理解和使用本报告内容，不应视本报告为做出投资决策的唯一因素。

东吴证券研究所

苏州工业园区星阳街5号

邮政编码：215021

传真：（0512）62938527

公司网址：<http://www.dwzq.com.cn>



东吴证券 财富家园