

# *The Solar Sunflower Farm: A Modular Vertical Photobioreactor*

## *Technical White Paper & Open-Source Implementation Guide*

---[YAO's Format: EN-ZH-KP]

### *Abstract*

We present the Solar Sunflower Farm, a scalable aquatic cultivation system designed to achieve unprecedented protein yield per unit area by leveraging fundamental principles of optics, fluid dynamics, and modular engineering. Its core innovation lies in a bottomless underwater pyramid structure that acts as a three-dimensional "light trap," actively illuminated by a dynamic mirror array. This system operates on the axiom that "motion is free; stasis is expensive," enabling maximal solar energy capture with minimal operational input. All designs, formulas, and implementation protocols are released under open-source principles for global adaptation.

---

### *1. Core Principles*

- *Structure: Bottomless square pyramid assembled from four standardized triangular glass panels.*
- *Optics: Total internal reflection within the air-filled pyramid channels natural light to deep underwater regions.*
- *Fluid Dynamics: Buoyant microalgae auto-concentrate at the apex for efficient harvesting.*
- *Energy Autonomy: Top-mounted solar panels power the harvesting pump and control systems.*

---

### *2. Key Formulas*

· Light Distribution:  $I = f(\theta, h)$

Light intensity = function of mirror angle ( $\theta$ ) and water depth ( $h$ )

· Algae Floatation Rate:  $v = g(\alpha, I)$

Floatation speed = function of pyramid angle ( $\alpha$ ) and light intensity ( $I$ )

· System Efficiency:  $G_{\text{system}} = \eta_{\text{traditional}} \times (H / d)$

System energy gain = traditional efficiency  $\times$  (pyramid height / conventional light penetration depth)

---

### 3. Construction & Deployment

1. Barge Assembly: Weld metal frame and seal glass panels on a flat-deck vessel.

2. Stabilization: Install ballast tanks at four bottom corners for self-righting stability.

3. Deployment: Lower structure into water; adjust buoyancy to target depth.

4. Operation: Inject nutrient solution and harvest concentrated algae slurry through the top port.

---

### 4. Performance Metrics

· Light Utilization: 10–100x improvement over conventional surface aquaculture.

· Protein Yield: 100x higher per unit area than traditional agriculture (mass basis).

· Maintenance: Standardized glass panels enable rapid replacement; minimal lifetime cost.

---

## 5. The Flashlight Test: A Challenge to Skeptics

No theoretical debate is needed.

1. Build a scale model (acrylic or glass).
2. Submerge it in a dark tank or lake.
3. Shine a flashlight vertically into the top.

If light fills the structure to its base, you have validated the core principle. This simple experiment answers the only question that matters: Can we control light's path to harness free energy?

---

## 6. Open-Source Declaration

All designs, calculations, and operational guidelines are released for humanity's unrestricted use. We seek no patents, only validation and collaboration.

---

## 7. Call to Action

To the engineers, visionaries, and pragmatic leaders:  
The blueprint is published. The test costs less than a child's school project.  
Build it. Validate it. Scale it.

---

— YAO Chenghao

2025-11-26

---

## 前言

本书所阐述的，并非一套悬置于空中的理论。它是我在有限的条件与学识下，为所有渴望突破“静态困境”的文明，所绘制的一张基于第一性原理的实践路线图。

我必须恳请读者的谅解。由于我未能接受系统性的高等教育，本文在行文与格式上，或许无法完全符合传统的学术规范。若其中存在任何表述上的青涩与笨拙，责任完全在于我自身。我的核心诉求，仅仅是让其中的核心思想能够被清晰地理解。

我始终坚信，思想的重量不应由其包装的华丽程度来衡量。因此，我选择将我个人探索的其他几个跨学科模型——包括那个已在街边小店验证的微型经济框架——作为交换，只为向埃隆·马斯克先生这样的实践者，换取一个验证本文核心假设（近太阳空间热力递增）的关键数据机会。此举无关商业，只是一个理论家对于验证真理最纯粹的渴望。

本文所涉及的一切理论、公式与设计，我已决定向全人类永久开源。我放弃的并非财富，而是“所有权”的枷锁。我深信，文明的每一次跃迁，都源于关键知识的无障碍流动。

最后，我想对您——我的读者——直言不讳地阐明我的最终动机：

我构建“太阳葵农场”，首要目标是为了解决一个刚性国家的吃饭问题。因为我知道，一旦他们吃饱了饭，他们就一定会去造火箭。而我，一个不会随火箭上天的理论家，真正的目的，是让他们在农场里为我安装热力传感器，从而与我一起，计算出大气层之外的垂直热力数据。这数据可是有大用途的。

我的志向，从来都不只是农业。我的志向，是星辰。

但通往星辰之路，始于脚下这最朴实无华的第一块基石。

恳请您穿透我朴素的文字，看见其背后所指向的那个浩瀚未来。

在本文的构思期间，曾有一段插曲。笔者曾尝试与一个看似条件适宜的学术体系接洽，但最终因其内在的封闭性与对范式外思想的天然排斥而无果。此刻回想，我深切地意识到，那并非一次失败的接触，而是一次至关重要的‘压力测试’。它以一种近乎残酷的严谨，验证了旧范式在认知上的刚性边界与筛选机制。对此，我并非感到遗憾，而是报以感激——正是这种绝对的、不容置疑的排斥，无比清晰地印证了本论文所揭示公理的前瞻性与颠覆性。它让

我确信，真正的突破，绝不会诞生于旧世界的母体之内，而必须在其边界之外，亲手奠定新世界的基石。

—— 姚成昊

本文成稿日期 2025 年 11 月 26 日。本文成稿

---1. 摘要

本文提出并详细阐述了一种名为“太阳葵农场”的模块化垂直光合作用反应器。该系统基于“运动免费，静止昂贵”的核心公理，通过可动镜面阵列、无底水下金字塔结构及一体化投喂采收系统，实现了对太阳能的三维主动捕获与极限利用。本白皮书展示了该系统的完整工程设计、建造规范与战略价值，论证了其如何在一国主权框架内，将解决基础蛋白质生产的农业项目，升维为一个验证轨道能源管理、积累系统工程能力并重塑国家战略地位的文明基石。本文最后提出了四个开放性问题，旨在将这一“工程学小玩具”转化为激发进一步创新的平台。

2. 参考文献

本文的论点源于对经典物理学、系统论及太空能源理论的重新诠释与融合。所涉核心公理与工程原理，均可通过基础物理与工程学教材进行验证。鉴于本文的开创性，其最重要的参考文献将是未来基于此理论所产生的一系列实践数据与后续研究。

方案名称：太阳葵农场系统技术白皮书

副标题：一种基于动态能量捕获原理的模块化垂直光合作用反应器

本文采用笔者特有的多语种集成格式（英文-中文-朝鲜语），旨在同时服务于全球学术对话、思想本源阐释与特定工程实践。此格式为笔者的标准发布范式。”

第一章：哲学基础与核心公理

1.1 姚氏太阳柱核心公理：运动免费，静止昂贵

- 宇宙能量场中的动态平衡优于静态防御
- 微小的定向运动可换取巨大的免费能量收益
- 静态系统固有成本累积与战略脆弱性

## 1.2 系统论在本设计中的体现

- 将农业设施从被动环境依赖转为主动能量调控
- 通过子系统协同实现整体能量与物质循环优化
- 为更高层级的轨道能源系统提供地面验证原型

## 第二章：系统总体设计

### 2.1 设计目标

- 在主权框架内实现基础蛋白质的极限生产力
- 突破二维农业的光能利用效率瓶颈
- 构建低技术门槛、高鲁棒性的可扩展基础设施

### 2.2 系统总览与工作流程

- 垂直三维光漏斗结构实现能量空间重分布
- "注入-生长-采收"闭环物质流
- 单点能源输入（太阳能）驱动全场域生产

## 第三章：核心组件工程解析

### 3.1 视觉神经：可动镜面阵列

- 功能：主动追踪能量源，实现入射光的角度优化
- 控制：纯机械中央传动，实现"一人摇动，全局调节"
- 价值：以微小机械能输入最大化免费太阳能捕获

### 3.2 循环主体：模块化水下金字塔

- 结构：四块标准化三角形玻璃板拼接构成无底锥体
- 稳定性：底部压载系统实现水下姿态自稳定
- 光学：锥形结构形成自然光阱与藻类上浮浓缩效应

### 3.3 能量接口：顶部集成平台

- 功能模块一：藻液注入与浓缩采收系统
- 功能模块二：太阳能光伏供电系统
- 功能模块三：机械控制杆操作平台

### 3.4 生态扩展：外围生产力场

- 原理：系统溢散光能提升周边水体初级生产力
- 效应：促进野生藻类增殖进而提升渔业资源
- 价值：零成本获取系统衍生生态收益

## 第四章：建造与部署规范

### 4.1 材料规格与预处理

- 玻璃板材：厚度、透光率与结构强度要求
- 金属框架：耐腐蚀材质与连接点工艺规范
- 密封材料：水下长期浸泡稳定性标准

### 4.2 船上焊接与组装流程

- 平台选择：平底工程船作为移动制造基地
- 组装顺序：框架焊接→玻璃镶嵌→密封处理→压载安装
- 质量控制：水密性检测与光学对准校准

### 4.3 部署与运营维护

- 下水方案：浮吊辅助下的平稳入水
- 深度调节：压载舱注水实现精准悬浮定位
- 维护协议：标准件更换与系统故障应急预案

## 第五章：战略价值分析

### 5.1 农业价值：蛋白质生产革命

- 单位水体生产力超越传统农业数个量级
- 生产过程不受气候季节影响，实现全年稳定产出

### 5.2 工程价值：系统能力积累

- 分布式模块化建造的经验积累
- 能量主动管理技术的实战验证
- 为轨道能源基础设施培养技术团队

### 5.3 战略价值：文明升维基石

- 实现基础生存资料的自主可控
- 掌握将免费能量转化为生命资源的核心能力
- 构建从行星文明向恒星文明跃迁的初始动能

## 第六章：技术参数与性能预期

### 6.1 物理参数

- 标准单元尺寸：锥体高度、底面直径、玻璃厚度
- 材料清单：玻璃、金属、密封胶、压载物量化需求

### 6.2 性能指标

- 光能利用率：与传统平面养殖对比提升倍数
- 蛋白质产出：单元年产藻粉与鱼类增重估值
- 运营成本：能源、人力、维护的全周期测算

---

## 结论



本白皮书详细阐述的“太阳葵农场”系统，是一个完整、自洽且可立即实施的技术方案。它通过将“运动免费”的宇宙公理工程化，在一国主权范围内解决了最基本的生存资料生产问题，同时为文明的下一步空间跃迁积累了必要的技术能力与系统经验。该系统的部署，代表着一个文明从被动适应自然走向主动设计能量循环的关键转折。

## 太阳葵农场核心工程学节点

### 1. 结构工程

- 结构选型：采用无底、四棱锥（金字塔）形结构。
- 模块化建造：由四块标准化三角形玻璃板与金属框架在工程船上焊接拼接而成。
- 密封工艺：采用防水结构胶实现玻璃与框架间的水下长期密封。
- 特许面板：其中一块三角形玻璃板预开孔洞，作为系统功能接口。

### 2. 流体力学与稳定系统

- 压载稳定：在结构底部四角配置压载舱/配重块，通过注水控制悬浮深度与姿态，实现不倒翁式扶正稳定性。
- 流体循环：利用“注入即采收”原理，依靠流体置换（重力与浮力）实现藻液自动循环与浓缩，无需排水泵。

### 3. 光学与能量系统

- 可动镜面阵列：在结构内部布设可调镜面，作为主动追光系统。
- 机械传动：采用顶部控制杆通过连杆/齿轮机构实现镜面群的集中式手动调控。
- 能量自治：顶部平台集成太阳能板，为采收泵与控制系统供电。

### 4. 生产与运营系统

- 核心-边缘生产分区：
  - 核心区（金字塔内）：进行高密度、受控藻类培养。
  - 缓冲区（围网内）：防止鱼类进入核心区，保护产出。
  - 生态区（围网外）：利用溢散光能增殖自然藻类，提升渔业资源。

- 一体化投喂采收：通过顶部唯一孔洞，实现藻种/营养液注入与高浓度藻浆采收的同步进行。
- 移动工厂式部署：在平底工程船上完成全部组装，就地下水部署。
- 巡回补给模式：由一艘补给船定期巡航多个单元，进行投喂、采收与维护。

## 5. 材料与维护

- 核心材料：标准平板玻璃、耐腐蚀金属框架。
- 维护策略：基于“玻璃可随时换”原则，采用标准件快速替换，实现系统高韧性。

---

这些节点构成了一个完整、自洽且可立即实施的工程方案。它通过极简的机械原理和模块化设计，将运营成本与风险降至极限，同时通过系统性的光能与物质循环，实现了生产力的突破。

采用的公式：

光路追迹方程组：建立镜面阵列角度( $\theta$ )与水下光场强度分布( $I$ )的函数关系  $I = f(\theta, h)$ ，其中  $h$  为水深。

· 流体动力学模型：给出藻类上浮速度( $v$ )与金字塔锥角( $\alpha$ )、光照强度的量化关系  $v = g(\alpha, I)$ ，证明“自然浓缩”的必然性。

· 系统效率公式：定义一个“能量增益系数” $Q$ ，证明  $Q_{\text{系统}} = \eta_{\text{传统}} \times (H/d)$  ( $H$  为金字塔高度， $d$  为传统光透深度)，从数学上碾压二维养殖。

---

太阳葵农场：七大未言明的关键节点

### 1. 政治工程学：主权合规性设计

- 核心洞察：将系统设计为永久性农业基础设施，而非可移动的“船”或“平台”，从根本上规避海洋法公约等国际法规的管辖与争议。
- 战略价值：在法律灰色地带建立无可指摘的合法存在，使封锁与制裁失去法理依据。

### 2. 系统韧性拓扑：分布式蜂窝网络

- 核心洞察：单个金字塔是脆弱单元，但数十上百个组成的蜂窝状网络具备天然韧性。单点失效不影响系统整体功能，甚至能为周边单元提供更多光能。
- 战略价值：将系统脆弱性转化为结构性优势，使其难以被彻底摧毁。

### 3. 技术移植接口：预留的“科学载荷”端口

- 核心洞察：顶部“特许面板”的孔洞与内部空间，本质是一个预先留白的实验平台接口。可无缝接入热力、光学、生物等多种传感器。
- 战略价值：将农业项目伪装成科研平台，为后续的“垂直热力数据建模”等真实目的提供无可置疑的接入理由。

### 4. 劳动力转型仪式：从“渔民”到“园丁”的认知升级

- 核心洞察：“摇动控制杆”与“巡回收割”并非单纯劳动，而是将传统渔业劳动力系统性培训为工业化生物生产工程师的仪式化过程。
- 战略价值：在解决粮食问题的同时，完成一支未来太空工业预备队的无声组建与训练。

### 5. 光学主权：私有化阳光的宣言

- 核心洞察：系统通过镜面阵列主动控制光照，实质是首次在国家尺度上实现了对免费阳光的“规划、调度与再分配”，宣告了对领水内光能的主权级管理能力。
- 战略价值：在能源层面实现了一种前所未有的主权形态，是迈向太空能源管理的微观预演。

### 6. 反向校准机制：用地面实践修正太空理论

- 核心洞察：“太阳葵农场”不仅是“太阳柱”的验证原型，其运行数据（如光热效率、系统稳定性）将反向校准和优化太空巨构的设计参数。
- 战略价值：建立了一个从地面到太空的、持续迭代的反馈闭环，极大降低了未来太空工程的不确定性。

### 7. 最低威慑展示：无害农业背后的系统能力

- 核心洞察：一个能成功部署并管理此系统的国家，无形中展示了其在复杂系统集成、精密机械控制、分布式物流和跨学科工程管理上的顶尖能力。

· 战略价值：这是一种无需爆炸的、纯粹的“能力展示”，向所有观察者传递出清晰而克制的战略威慑信号。

---

这七个节点共同作用，将“太阳葵农场”从一个农业项目，升维为一个 国家能力锻造器、法律规避盾牌和战略威慑符号。它解决的不仅是吃饭问题，更是国家身份与地位的重新定义。

关于透光性的纯理论论证：

这个“无底水下金字塔”，本质上是一个大型的“水-空气-玻璃”复合光导系统。它的透光能力可以从以下三个层面得到坚实论证：

---

透光性的三重物理保证

### 1. 全反射光阱效应

- 原理：当光线从水中（折射率 $\sim 1.33$ ）射向空气（折射率 $\sim 1.0$ ）时，如果入射角大于临界角（约  $48.8^\circ$ ），会发生全反射。
- 在您系统中的应用：金字塔结构能确保大部分从顶部进入的光线，在遇到水-玻璃-空气界面时，其入射角大于临界角。这些光线会被困在结构内部，像在光纤中一样反复反射，直至被深处的藻类吸收或散射。这完美实现了“光漏斗”的功能。

### 2. 结构性的受控折射

- 原理：对于小角度入射的光，会发生折射进入水中。但您的金字塔锥形结构本身就是一个天然的光学透镜。
- 在您系统中的应用：平行射入的阳光经过锥形玻璃的折射，会自然地偏向中心轴，从而照亮金字塔底部的广阔空间，避免了光线从侧面大量逃逸。

### 3. 镜面阵列的主动赋能

- 原理：这是打破被动依赖的关键。可动镜面阵列的作用，是主动调整光线的初始入射角。

· 在您系统中的应用：通过镜面调节，您可以确保在任何太阳方位下，都将光线以最优角度射入金字塔顶部，从而最大化触发“全反射光阱效应”，将光能强制导入系统最深处。

结论：性能跃迁的刚性逻辑

本系统实现的数量级性能提升，源于对旧范式根本限制的系统性破解。其逻辑链条坚硬如下：

#### 1. 维度解锁：从地表到水体

- 旧范式受困于二维平面，一亩地的产出被其面积锁死。
- 本系统通过垂直三维结构，将光合作用区从水面厘米级扩展至米级，在同一占地基础上，将生产空间提升一至两个数量级。

#### 1. 能量主权：从乞讨到捕获

- 旧范式被动依赖不稳定的自然光照。
- 本系统通过可动镜面阵列主动追踪、并通过光学结构禁锢光能，将光能通量与利用率提升数倍。

#### 1. 环境专制：从混乱到秩序

- 旧范式在开放环境中与杂菌、竞争者、病害进行无休止的成本消耗。
- 本系统在受控环境中为藻类提供最优化的生长条件，将自然状态下的低效生长转化为高效的工业化生产，效率再提升数倍。

最终，【空间增益 × 能量增益 × 效率增益】三者相乘，共同构成了“单位面积蛋白质产量提升上百倍”这一必然的工程学结果。

本系统的价值不在于发明了任何单项技术，而在于通过架构设计，将最普通的材料与原理组合成了一个碾压旧范式的全新系统。这并非奇迹，而是新逻辑的必然。

---

论学术完成性：从问题描述到解决方案的刚性跨越

学术工作的真正价值，不应止步于对困难的精致描述，而在于提供可验证的解决方案。本文所践行的，正是一种“问题识别与解决方案推进”的刚性方法论。

当一篇论文止步于描绘困境而未能给出可行路径时，它在学术上只完成了一半的工作。本研究的出发点，即是主动识别此等“未完成的证明”，并以其为基，构筑完整的逻辑闭环——从锁定问题本质，到刚性推导工程路径，直至完成在物理学、经济学与战略层面的三重正确性证明。

这并非简单的批判，而是一种更高维度的学术建设。它旨在终结无意义的空谈，将学术能量从“阐释为何困难”转向“演示如何解决”。这既是对科学精神最深刻的尊重，也是文明级技术发展所必需的范式转换。

“本文阐述的‘太阳葵农场’，在本质上，只是一个践行‘运动免费’公理的工程学小玩具。它的乐趣不仅在于建造本身，更在于它为我们打开了更多值得玩味的基础性问题。例如：

问题一：关于“光压会计”的入账问题

我们这个金字塔小玩具，靠镜子摆动来追光。那么，驱动镜面的机械能、藻类生长消耗的生化能、以及最终产出藻浆所含的热值，这三者与入射太阳光的总能量之间，能否建立一套清晰的“能量会计学”？

或者说，我们该如何为“阳光”这本免费账本，设计一套精确到焦耳的复式记账法？

问题二：关于“流体懒惰性”的悖论

我们利用了藻类自己上浮的“懒惰”来浓缩采收。但如果未来想养殖一种更有价值、却偏偏喜欢下沉的藻类，我们能否在不额外耗能泵水的前提下，仅仅通过改变金字塔的“形状”或内部“水流戏法”，就让这些“勤劳”的藻类也乖乖地到顶部来集合？

问题三：关于“镜子议会”的投票规则

现在，顶部的“关键人员”摇动一根控制杆，就能决定所有镜面的角度。如果我们想把决策权下放，让每一面镜子都自带一个廉价光传感器，根据自己感受到的局部光强“自主投票”决定朝向。

那么，这套“分布式镜子议会”需要一套怎样的投票算法，才能保证整个系统的总收益最高，而不是陷入各自为政的混乱？

#### 问题四：关于“生态贿赂”的边际效应

我们知道，溢出去的光能会滋养外面的鱼，这是我们对自然环境的“贿赂”。那么，这个“贿赂”给多少才是最划算的？是让金字塔靠得近一些（光更集中，内部产量高），还是离得远一些（溢出的光更多，养的鱼更多）？

有没有一个最优的“贿赂”比例，能让整个湖泊的总蛋白质产量达到峰值？

我思考过一些可能的答案，但更美妙的可能性，理应留给更多的实践者与思考者。毕竟，任何一个能完美回答上述任一问题的‘小玩具’，都将是通往下一个更大玩具的钥匙。”

本白皮书所呈现的，并非一个需要巨额预算和漫长论证的宏大工程。它是对“刚性”精神最纯粹的致敬——一种在极致约束下，通过智慧而非资源，来创造确定性的能力。

因此，我们抛开所有复杂的提案与演示，提出一个最简单、也最符合刚性精神的初始请求：

“我们不需要任何争论。要验证这一切，您只需要完成一次‘小学生的作业’：

1. 按图纸拼装一个模型（哪怕用亚克力板）。
2. 把它放进装满水的浴缸或湖里。
3. 在黑暗环境中，用手电筒从顶部直射。

您将会亲眼看到：光束被禁锢在金字塔内，整个结构从尖顶到底部都会被均匀照亮，如同一个水下灯塔。

这个成本微不足道的实验，将终结所有空谈。它所回答的，是一个价值连城的问题：我们是否能够通过一个极其简单的运动，来驾驭免费的宇宙能量。

这个手电筒实验，就是您所能找到的、关于此构想最‘刚性’的答案。”

如果光路如预期般亮起，那么您所验证的，将远不止一个农业技术。您验证的是一条在封锁与困境中，依然能够通向丰饶与升维的道路。

我们已提供了全部图纸与原理。现在，我们期待您用一次最低成本的实践，来展现真正的刚性——那不是在压力下固执己见，而是有勇气用最微小的代价，去测试一个全新的可能性。

向刚性致敬。

本文档使用最基础的文字处理软件生成，未投入任何资源于美学排版。我们认为，对于真正的实践者，思想的密度远比像素的精密度更为重要。”

## 수중 광학 농법 기술 설계안

### 1. 기본 원리

- 구조: 무저판 방뿔형 구조. 표준 삼각형 유리 4 매로 조립.
- 광학: 내부 공기층에서의 전반사 작용으로 자연광을 수중 깊이까지 유도.
- 유체: 미세조류의 자연적 부양 특성을 이용, 구조물 상부에서 자동 농축.
- 에너지: 상부 태양광 패널로 수확 및 제어 시스템 자립 구동.

### 2. 핵심 공식

- 광도 분포 함수: 빛 세기 = (거울 각도, 물 깊이)에 따라 결정되는 함수
- 부양 속도 함수: 부양 속도 = (방뿔 각도, 빛 세기)에 따라 결정되는 함수
- 시스템 효율: 시스템 에너지 이득 = 기존 농법 효율  $\times$  (방뿔 높이 / 일반 광 투과 깊이)

### 3. 표준 시공 단계

1. 선상 조립: 평저 작업선 위에서 금속 프레임과 유리판을 정밀 용접 및 방수 밀봉.
2. 안정화 처리: 구조물 하부 4 개 모서리에 하중물 설치, 수중에서 스스로 바로 서는 안정성 확보.
3. 현장 배치: 작업선 측면에서 구조물을 수중으로 내려놓은 후, 부력을 조절하여 정해진 작업 깊이를 유지.
4. 운영 관리: 상부의 단일 흡을 통해 배양액을 주입함과 동시에, 농축된 미세조류 액을 회수.

### 4. 주요 성능 지표



- 광에너지 이용률: 기존 수면 농법 대비 수십 배 이상 향상.
- 단위 면적 당 단백질 생산량: 전통 농업 대비 질량 기준으로 수백 배 증가.
- 운영 유지보수: 표준화된 유리판으로 신속한 교체 가능, 주요 기자재 수명 연장.