



推进清洁金属

印尼镍和铝工业中的自备发电脱碳



作者与致谢

作者

Rizky Fauzianto 安迪卡 Akbar Hermawan 布莱恩 O'Hanlon 维尼 Rizkinigayu 拉赫马特 Setiadi 能源转型机制顾问

作者按字母顺序列出。除非另有说明，所有作者均来自RMI。

联系人

Andika Akbar Hermawan, andikaakbar.hermawan@rmi.org
里兹基·弗瓦兹亚托, rfauzianto@rmi.org
Wini Rizkinigayu, wini.rizkinigayu@rmi.org

版权和引用

丽兹基·福亚尼安托，安德ika·阿克巴尔·赫马万，布莱恩·奥哈龙，温尼·丽兹基宁盖尤，和拉赫马特·塞迪阿迪，
推进清洁金属：印尼镍和铝工业中的自备电力脱碳化，RMI, 2025, <https://rmi.org/insight/advancing-clean-metals-decarbonizing-captive-power-in-indonesias-nickel-and-aluminum-industries> .

rmi重视合作，旨在通过分享知识和见解来加速能源转型。因此，我们允许利益相关方通过知识共享cc by-sa 4.0许可协议来参考、分享和引用我们的工作。 <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/> .

致谢

作者感谢我们的RMI同事拉克兰·赖特、吴昊、李伟和岳欣，他们为全球市场关键矿产脱碳实践提供了深入的审查和实质性的意见。



关于 RMI

落基山脉研究所（RMI）是一家成立于1982年的独立、非党派非盈利组织，通过市场驱动的解决方案改造全球能源系统，为所有人创造繁荣、有韧性、清洁的能源未来。通过与商业、政策制定者、资助者、社区和其他合作伙伴合作，RMI推动投资以扩大清洁能源解决方案，减少能源浪费，并提高获得负担得起清洁能源的机会，这些方式增强了安全，加强了经济，并改善了人们的生活。RMI在60多个国家开展活动。

目录

执行摘要

4

镍和铝业中电力脱碳的战略要务..... 5

为印度尼西亚镍和铝行业实现电力部门脱碳势在必行。

镍和铝加工正在迅速扩张..... 6 快速的镍和铝扩张正在推动能源排放.....
..... 8 镍和铝能源供应的脱碳必要性..... 8

铝和镍加工中的排放：来源、技术和减排 10

理解镍和铝价值链上的排放分布.....10 镍和铝加工技术的排放强度比较.....12

处理背后的力量：镍和铝行业的在用电力增长... 14

被俘获的发电能力，尤其是在煤炭方面，在过去十年中显著增加，这得益于镍行业的推动..... 到20
30年，为镍和铝加工设施通过被俘获功率供应能源的前景.....16

权衡取舍：captive Coal Default, Renewable Energy, Grid Connections and Their Constraints 17

天然气和可再生能源的约束。 17 比较经济学：LCOE的关键要点..... 18
面向电网集成：减少受电依赖..... 20

面向镍和铝产业的竞争性脱碳电力路径.....22

被俘煤炭：印度尼西亚脱碳政策中日益增长的矛盾.....22 从工业电力系统转型面临的挑战..... 2
2
推动清洁工业增长的有意市场激励和机制将是关键。24 确保公正转型，并利用市场机会发展低碳产品。25

脚注 27

执行摘要

印度尼西亚快速扩张的镍和铝加工是该国关键矿产“下游化”战略的核心。该战略在印度尼西亚更广泛的发展议程中发挥核心作用，旨在通过促进国内加工和精炼来增加国内资源的附加值。在此背景下，镍和铝在过去十年中经历了显著增长，使这些关键矿产成为该国的旗舰。然而，这种扩张是由离网燃煤电站的激增所驱动，这现在对印度尼西亚的气候目标和其在低碳市场的竞争力构成重大威胁。

基于RMI研发的数据库，该数据库汇集了政府和公共来源的 captive power capacity 数据，印度尼西亚的 captive power capacity 已超过两倍，从2019年的9.6吉瓦 (GW) 增长到2024年的22.9 GW。其中超过81%的 capacity，即约18.6 GW，是燃煤发电，且完全不受PLN（印度尼西亚国家公用事业公司）监管。增长主要集中在镍行业——尤其是高耗能的回转窑电炉 (RKEF) 炼矿厂，这是一种火法冶金加工技术，占 captive capacity 的61%，即近14 GW。铝加工规模虽小，但仍增加了约1 GW，其中更大份额来自水电。

预计这一趋势将持续下去。如果当前项目按计划进行，到2030年，镍和铝行业将在自备电力需求方面实现显著增长。其中仅镍行业预计将新增6.5吉瓦的产能，其中90%，即5.8吉瓦，将使用燃煤发电。同时，铝行业预计将贡献第二大的增长，新增自备电力约3.8吉瓦，其中63%，即2.4吉瓦，将来自燃煤。

因此，燃煤自备电厂现在已成为印尼新增燃煤装机容量的主要驱动因素。根据PLN的电力供应业务计划RUPTL 2025–2034，尽管没有计划开发新的并网燃煤电厂，但预计到2030年，新增约8.5吉瓦的自备燃煤电厂装机容量将超过并网新增量。这种扩张风险会将数十年高排放锁定，并直接破坏印尼在2060年前实现电力部门排放峰值和碳中和的承诺。

气候影响已经可以感知。2023年，仅镍相关活动就排放了1702万吨CO₂ (MtCO₂)，相当于印度尼西亚能源部门和工业过程排放的22%

并且产品使用——其中电力占行业排放的大部分（60%）。一个计划于2025年完工的，由1.1吉瓦 (GW) 自有煤炭供电的500千吨 (kt) /年铝冶炼厂预计每年排放5.2百万吨二氧化碳 (MtCO₂)，占国家电力部门总排放量的近2%。

尽管政府已根据第112/2022号总统令承诺减少自备煤的排放，但工业区和国家战略性项目的豁免继续使煤炭扩张得以进行。这种监管空白，加上电网接入受限、市场信号微弱以及²验证排放数据缺乏，正使煤炭在未来数十年内继续稳固地占据印尼最具战略重要性的出口部门。

镍和铝行业中电源脱碳的战略要务

全球向低碳供应链转型正在给印尼关键矿产行业带来挑战和机遇。欧盟的碳边境调节机制（CBAM）、电池护照等贸易工具，以及第一行动者联盟等买方联盟正在为可验证的低排放材料设定新基准。国内方面，印尼计划采用总量控制与交易（cap-and-trade）方式的排放交易系统（ETS）拟于2025年对自备电厂实施，这将进一步抬高依赖煤炭的生产商的博弈筹码。

同时，不断下降的国际镍价给生产商带来了财政压力，其中许多生产商已经处于微薄的利润空间。全面转向可再生能源仍然具有挑战性，特别是在可再生能源潜力有限的地区。尽管PLN在其RUPTL 2025–2034计划中已概述了将电网接入关键工业中心的计划，但仍存在重大的技术和财务挑战。输电发展需要高额的前期资本投资，并需要长期的需求确定性来证明项目的可行性，特别是在偏远地区或欠发达地区。

在此背景下，将可再生能源与现有化石资产相结合的混合动力系统或许能为减少排放和成本控制提供务实的近期途径。然而，这些必须被视为过渡性的。为确保长期可持续性和气候一致性，该国的工业战略必须包括一个具有前瞻性的框架——一个减少化石能源、扩大清洁能源，并对碳约束全球贸易不断变化的需求做出响应的框架。



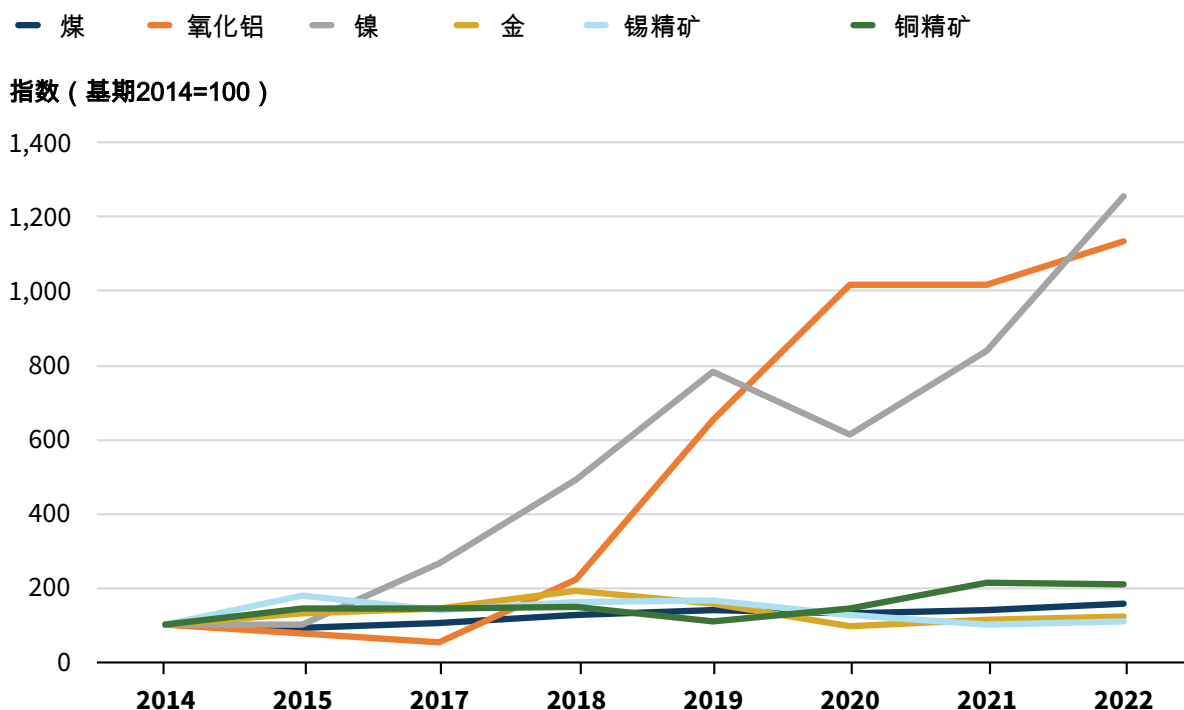
为镍和铝脱碳化印度尼西亚电力部门势在必行

镍和铝的加工正在迅速发展

镍和铝是印度尼西亚增长最快的工业领域之一，这得益于政府的下游化战略。随着全球对电动汽车、电池和清洁能源技术的需求不断增长，这些矿产已成为印度尼西亚工业政策的核心。该下游化战略旨在通过发展本地加工工业，从国内资源中获取更大的经济价值，从而减少对初级材料出口的依赖。

在过去的十年里，印度尼西亚战略性地将其丰富的关键矿产，尤其是镍和铝土矿，置于这一转型的核心（参见附录1）。政府对2020年镍矿石和2023年铝土矿的出口禁令，催化了国内冶炼和精炼能力的快速扩张，特别是在苏拉威西、加里曼丹和马鲁古等矿产资源丰富的地区。

图1 印度尼西亚矿产资源生产的指数增长，2014–22



注意：该图表展示了以2014年为基准年（指数=100）的矿产生产指数值。

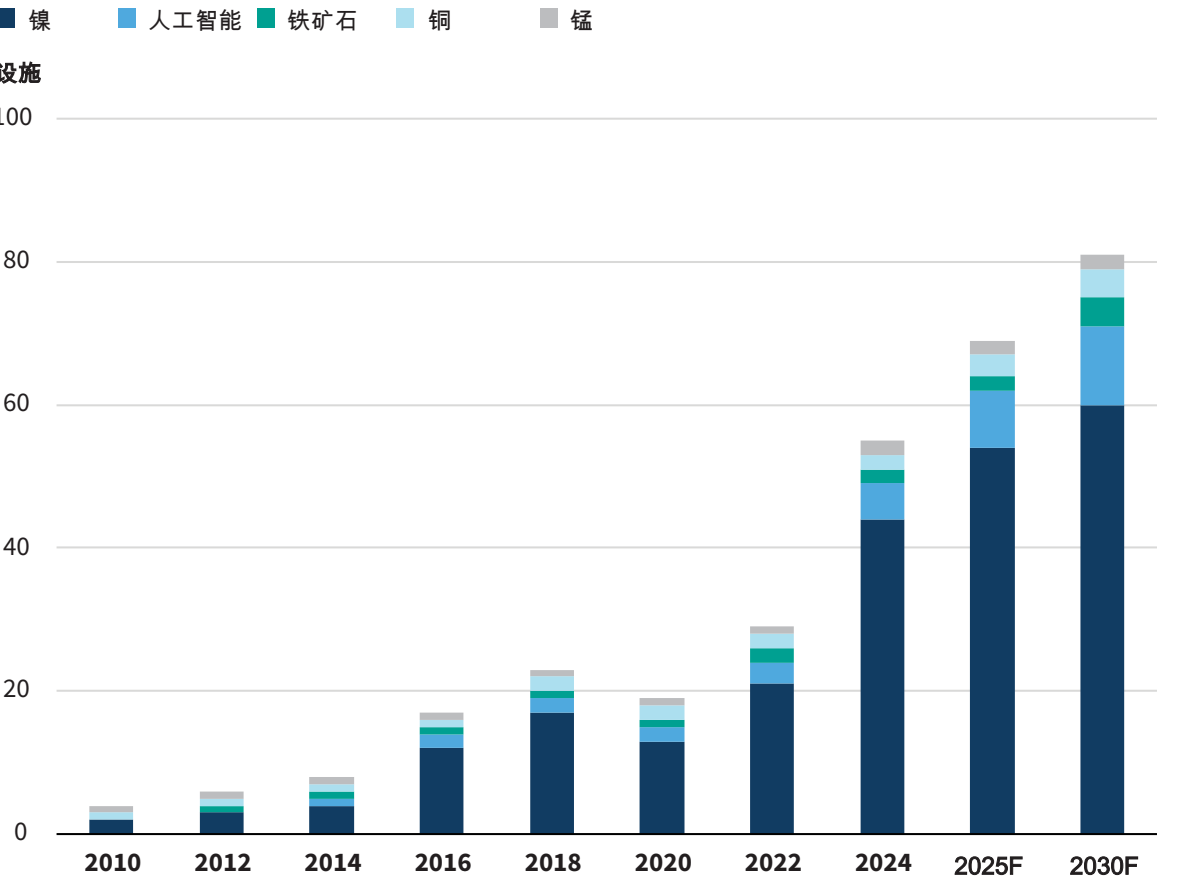
注意：此图展示的是以2014年为基准年（指数=100）的矿产生产指数值。该值是一种用于比较不同矿物增长趋势的标准化方法，无论其原始单位如何。为了比较不同矿物的增长趋势而进行的标准化，无论其原始单位或生产如何生产量。2016年数据不可用。卷册。2016年的数据不可用。

RMI图形。来源：印度尼西亚统计局 RMI 图形。来源：印度尼西亚统计局

镍已成为印尼的主要矿产。产量迅速扩大，2023年占全球产量的50%以上。¹ 并巩固了该国在市场上的主导地位。在全球范围内，镍需求在 2018 年至 2020 年期间保持稳定，约为 240 万吨（Mt），但随后在 2023 年显著增长至 3.1 Mt。² 历史上，镍的需求主要由合金驱动，2015年占镍总需求的75%。然而，从2020年到2023年，需求大幅转向清洁能源领域，成为这一时期整体需求增长30%的主要因素。国际能源署预计，在常规情景下，需求将进一步提升至2030年的4.5Mt，在净零情景下，需求将提升至2030年的5.6Mt。

氧化铝也经历了快速发展，全国各地都在建设更多炼铝厂以支持氧化铝精炼和铝的生产。2023年，印度尼西亚有四家氧化铝精炼厂在运营，能够加工12.25百万吨氧化铝，年产量超过4.3百万吨。³ 同年，该国年度铝产量约为250万吨，而国内需求约为1000万吨。⁴ 印尼氧化铝和铝加工业的发展是政府为满足国内需求、减少对进口依赖而采取的战略举措的一部分。

表2 印度尼西亚矿产行业冶炼设施增长（2010-30年）



注意：数据反映的是熔炼设施的数量，而不是单个处理单元或正在运行的熔炼线 注意：数据反映的是运行中的冶炼设施数量（不是单个处理单元/生产线）
正在建设中或已获许可的预测基于管道项目和国家目标 在建或经许可。2025年和2030年的预测基于管道项目和政府目标。
MI 快速来源：能源和矿产资源部MMetromindo 工业部 RMI 图形。来源：能源与矿产资源部（MEMR）、Petromindo、工业部

如附表2所示，到2030年，如果当前项目按计划进行，印度尼西亚预计将拥有大约60个镍冶炼设施。⁵ 代表从2014年以来增长了十倍以上。这些新的发展大部分集中在苏拉威西和马鲁古。铝行业以更稳健的步伐扩张。预计到2030年，铝冶炼或氧化铝炼厂的数量将达到至少11个设施，包括七个氧化铝炼厂和四个铝冶炼厂，新项目主要位于加里曼丹和苏门答腊。

快速镍和铝膨胀正在驱动能源排放

冶炼厂的扩张导致了工业排放激增，特别是为加工设施供电的自备电厂。仅2023年，从采矿到加工的镍相关活动就估计导致了170.2 MtCO₂排放。⁶ 约等于印度尼西亚能源部门和生产过程及产品使用排放的22%。其中，约60%归因于电力消耗，主要是为了满足冶炼作业的高、连续能源需求。²，

对于铝土矿相关加工，涵盖铝精炼和铝熔炼，截至本报告发布时，全国排放总量尚未完全量化。然而，一项研究表明，计划于2025年在加里曼丹完成的一座年产能力为500万吨的铝熔炼厂，由一座1.1吉瓦（GW）的自备燃煤电厂供电，预计将排放约5.2MtCO₂，相当于印度尼西亚2022年电力行业排放总量，当年排放量为每年296 MtCO₂。排放量将相当于近2%。

7

利用自备电厂支持炼铝厂运营的重要性不言而喻。据估计，到2024年，印度尼西亚的自备电厂容量约为22.9吉瓦，是2019年9.6吉瓦的两倍多。这种显著增长主要由镍加工的快速扩张推动，目前镍加工占自备容量的约61%，即14吉瓦。随着仍在建设中镍设施的完成，预计未来几年该数字将显著增长。铝业虽然以更稳健的步伐扩张，但目前利用约1吉瓦。然而，随着几家氧化铝精炼厂和铝精炼厂的开工，该领域的自备电力需求预计也将上升。值得注意的是，总自备电力的约81%，即18.6吉瓦，仍由燃煤电厂产生，这突显了工业部门继续依赖煤炭来满足其能源需求。

对自备电力的日益依赖，尤其是燃煤发电，说明了印度尼西亚能源和工业体系内部更深层次的结构挑战。随着工业的发展，特别是从下游矿产中发展而来，对专用自备电力基础设施的需求也在增加。2025年国家电力总体规划（RUKN）估计，到2060年，工业部门将占全国总电力需求的43%，这是所有部门中最高份额。炼铝厂，特别是对关键矿产的炼铝厂，被认为是工业电力需求的主要驱动因素，许多炼铝厂仍预计将依赖燃煤发电。

镍和铝能源供应的脱碳要求

印度尼西亚镍和铝冶炼产业的显著增长，伴随着其对燃煤自备电厂的严重依赖，凸显了向可持续能源转型迫在眉睫的需求。随着冶炼运营在国家战略下游加工倡议的推动下持续快速扩张，其巨大且持续的能源需求进一步巩固

对燃煤发电的依赖，给减排和环境可持续性带来了重大挑战。

随着全球贸易和投资格局的演变，市场正变得越来越关注碳排放。欧盟的碳边境调节机制（CBAM）和电池护照等机制，以及印度尼西亚的排放交易系统（ETS）等新兴国内政策，正在重新定义工业产品的碳足迹竞争力。在此背景下，为能源密集型产业实现电力脱碳不仅对于实现印度尼西亚的国内气候目标至关重要，而且对于确保未来的市场准入和保护印度尼西亚镍和铝产品的长期竞争力也至关重要。

本报告重点关注镍和铝，因为这两种金属在未来几年中生产能力和能源需求都将迎来显著增长。此外，镍冶炼设施正在建设或计划中，这加强了镍在印尼下游工业扩张中的中心地位。类似地，铝的战略重要性日益凸显，已有多个氧化铝精炼厂和铝冶炼厂计划或正在实施。这些设施不仅资本密集，而且能源密集度极高。因此，这两个行业的增长将显著推动工业能源需求和相关排放，尤其是在自备电厂的建设中。

在电力脱碳是一个关键步骤的同时，认识到工业排放并非仅由电力驱动也是至关重要的。理解排放在整个价值链中的发生位置，从采矿到精炼再到冶炼和下游加工，都是必不可少的。没有这种清晰度，只关注电力解决方案的风险是忽视其他高影响排放源，例如热能使用、与过程相关的 CO₂，以及物料投入。

2



镍和铝加工中的排放：来源、技术及减排

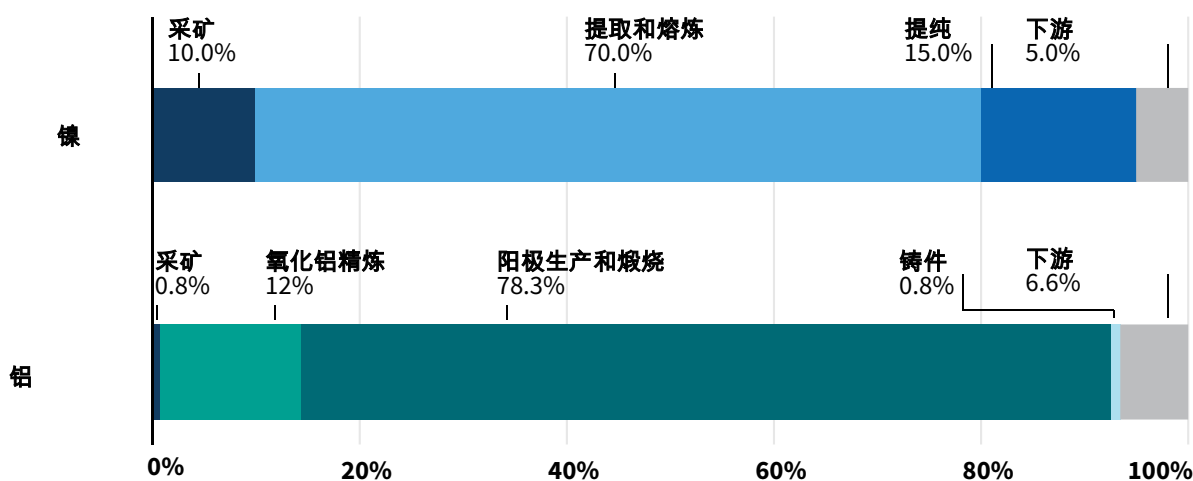
理解镍和铝价值链上的排放分布

印尼镍和铝行业的快速增长如前所述，需要更深入地审视排放源及其减排潜力。理解这些排放对于制定有效的脱碳策略至关重要。

图3展示了镍和铝从采矿到下游应用的整个价值链上的排放分布。提取和处理阶段是这两个价值链排放的主要贡献者。这些矿物的排放特征因不同阶段和技术路径而异。在这两个领域中，排放源包括电力消耗、热能、与工艺相关的 CO 排放，以及辅助材料的使用。

2

图3 镍和铝价值链中的排放分布



备注：排放包括来自固定和非固定站的燃烧以及处理

注意：排放包括固定源和非固定源的燃烧，以及加工材料 如还原剂、电力、热源以及废料和逸散排放物 例如还原剂、电力、热源以及废气和逸散排放。

MI 快速来源：国际铝业协会 RMI图形。来源：国际铝业协会 <https://360solutions3.amazonaws.com/s.> 和 国际金融

documents.worldbank.org/zh/publication/documents-reports/documentdetail/009422010202312964 和 国际金融

公司 <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/099422010202312964>

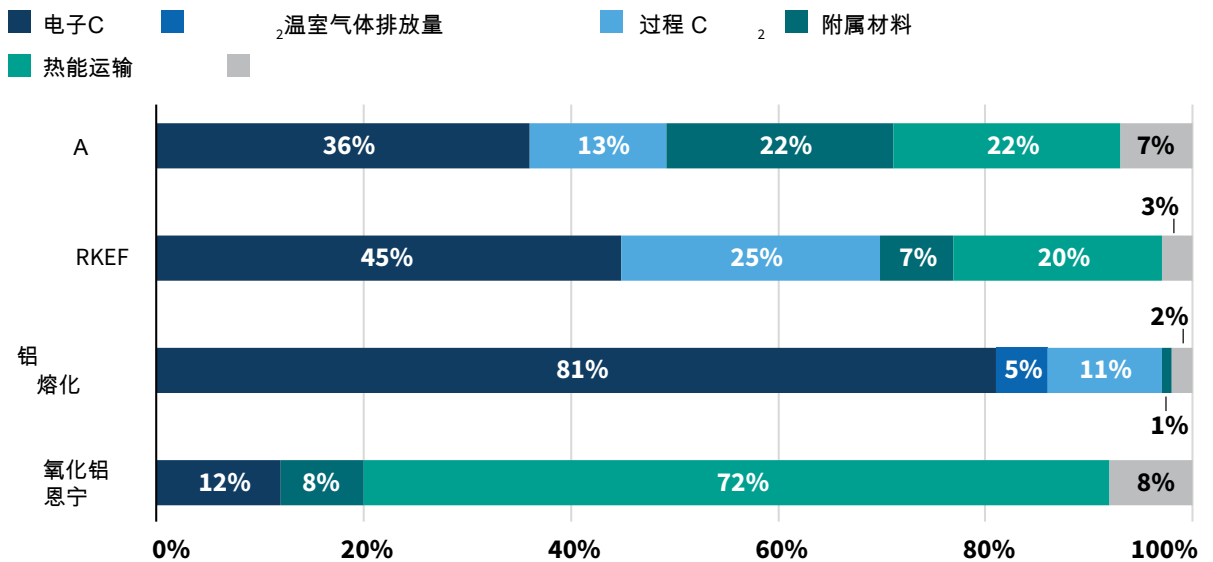
在镍加工领域，已出现两种主要技术路径：回转窑电炉（RKEF），一种火法冶金工艺，以及高压酸浸（HPAL），一种湿法冶金工艺。这两种方法在工艺特性、排放强度和最终产品上存在显著差异。

RkeFs主要用于生产铁镍合金（FeNi）或镍生铁（NPI），这些材料主要用于不锈钢工业。然而，RkeF衍生的产品还可以进一步精炼成镍 matte，然后加工成镍硫酸盐——这是电池生产的关键前体。相比之下，Hpal直接目标是生产富含镍和钴的混合氢氧化物沉淀物（MHP），这是一种中间产品。MHP可以进一步精炼成镍硫酸盐，这使得Hpal成为支持电动汽车和储能行业的关键技术。

铝价值链始于铝土矿的开采，铝土矿被精炼成氧化铝，并通过熔炼生产原铝。与镍相似，印尼一直在扩大其在铝生产方面的下游产能，旨在加强其在为能源转型技术和基础设施建设供应关键材料方面的地位。

图4说明了镍和铝加工价值链内部的排放源分解情况，展示了与每种生产工艺和阶段相关的不同排放特征。值得注意的是，不同工艺之间的排放源差异很大。

图4 镍和铝加工中按来源划分的排放物分解



注意：电费是指电力消耗产生的排放量，产品价值是全球平均。注意：RKEF适用于NPI/FeNi产品。数值为全球平均值。电力包含所消耗电能的排放。

电解过程中，铝泵和其他电子系统将热能转化为燃烧。在电解过程中（铝），RKEF、泵和其他电子系统。热能是指燃烧化石燃料用于热和蒸汽。二氧化碳排放包括阳极氧化、还原剂和中和剂等化学反应的排放。非二氧化碳气体是指具有全球变暖潜力的气体，例如含氟碳化物。辅助原料包括上游排放物，如烧碱、石灰和硫酸。全氟碳化物。辅助原料包括上游排放物，如烧碱、石灰、硫酸和以及碳阳极运输所覆盖的从运输原料产生的排放。碳阳极。运输涵盖了运输原材料时的排放。

快速资料来源：国际铝业协会 RMI图形。来源：国际铝业协会 <https://www.icas.org/real-time-data/real-time-data> 和 nickel 学院 ie C 循环 <https://nickelinstitute.org/media/r5wn5u4j/2025-lifecycledata-executive-summary.pdf> <https://nickelinstitute.org/media/r5wn5u4j/2025-lifecycledata-executive-summary.pdf>



在镍加工中，RKEF排放主要受电力消耗（45%）驱动，而与工艺相关的CO₂电力（36%）和热能（22%）是主要贡献者。然而，HPAL也产生大量的非CO₂排放（22%），这说明脱碳必须解决除电力之外的多个排放流。在HPAL过程中，²温室气体（GHG）排放（13%）以及显著的与工艺相关的CO₂排放

在铝加工中，冶炼阶段因其高度依赖电力而突出，由于电解还原过程，其构成约81%的总排放。然而，过程相关的CO排放（11%）也代表一个重要的额外排放来源。相反，氧化铝精炼排放主要由热能（72%）主导，反映了精炼铝土矿的高温要求。²

尽管本文件深入探讨了电力问题，但分解分析明确表明，仅靠电力脱碳并不足以完全脱碳整个价值链。镍和铝加工在其价值链各阶段的有效策略也必须解决热能使用、工艺相关CO₂排放和非CO₂温室气体排放等其他关键排放源，从而需要全面的排放管理方法。

镍和铝加工技术的排放强度对比

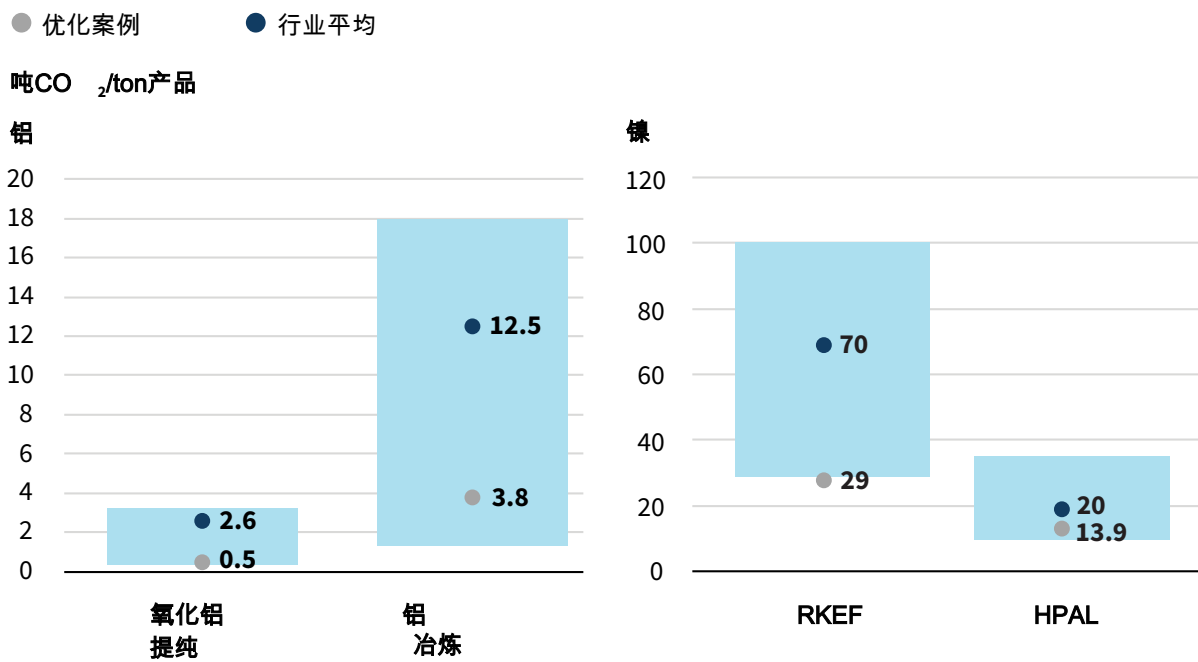
从更近的距离观察各种加工技术的排放强度在表5中进一步说明。在各种加工技术中，RKEF操作被认为是碳强度最高的过程之一。在印度尼西亚，RKEF操作通常每吨产品排放70-100吨CO（tCO/t），主要是由于² ² 依赖自备煤电厂和煤还原剂。然而，一个苏拉威西岛公司的镍加工表明，碳排放可以显著优化到约29 tCO/t，尤其是当² 水力发电被用作主要的电力来源。

相比之下，采用余热回收的公司的HPAL全球平均水平更接近20 tCO/t

² 和运营效率能够低至7-13.9 tCO/t。换句话说，HPAL展示了其他²

因为它会产生大量的酸性尾矿——每生产一吨镍就会产生1.4-1.6吨废料，所以它面临着环境挑战⁸——这会造成显著的环境风险，尤其是在没有妥善中和或储存时。

第五张展品 镍和铝加工的排放强度范围范围
技术 技术



注意：所示排放强度为范围1（直接排放）和2（间接排放），为每吨的吨CO₂。
产品反映全球范围，钻石指示行业平均数，圆形代表优化案例 产品。条形图反映全球范围；菱形表示行业平均水平；圆形代表优化案例，其中运营效率高且大量使用可再生能源。

MI 快速资料来源：国际铝业协会 RMI图形。来源：国际铝业协会 <https://steps.b8ienceleratealuminum.com/m/assets/custom/010856/downloads/实现1.5对齐铝材的可能.pdf> ；尼古拉斯 институт 生命周期数据 <https://nickelinstitute.org/media/r5wn5u4j/2025-lifecycledata-executive-summary.pdf> ；能源研究所 <https://nickelinstitute.org/media/r5wn5u4j/2025-lifecycledata-executive-summary.pdf> ；经济学与金融分析I 经济学与金融分析 (IEEFA) <https://ieefa.org/resources/indonesias-nickel-companies-need-renewable-energy-amid-increasing-production-and-sustainability-report-renewable-energy-amid-increasing-production> ；以及多家公司的可持续发展报告

在铝价值链中，冶炼也具有高度碳密集性，平均排放强度为12.5 tCO₂/t铝，这主要源于电解所需能源。然而，利用可再生电力，例如一家位于加里曼丹的公司利用水力发电，可将排放降至3.8 tCO₂/t铝。电解铝的效率范围较广，从0.5到3.0 tCO₂/t铝，这取决于能源来源和技术。

全球经验表明，通过有针对性的技术选择和市场激励，可以实现显著的脱碳。中国和澳大利亚的铝和镍生产商越来越多地转向可再生能源来实现减排。在中国，铝生产商正战略性地将生产能力转移到水电丰富的省份，如云南，显著减少对燃煤自备电站的依赖。一家总部位于澳大利亚的公司与美国汽车制造商签订了长期低碳镍供应协议，突显了市场激励如何推动产业脱碳。为此，该公司已进入可再生能源电力购买协议（PPA），使其在澳大利亚西部生产的镍能够使用100%清洁能源。这些例子证明，在提供适当的基建和市场激励的情况下，高排放工艺可以大幅降低其碳足迹。

处理背后的力量：镍和铝行业的受制电力增长



镍和铝冶炼厂，特别是，需要大量的、持续的、可靠的动力供应，通常位于现有电网基础设施很远的地方。在没有有限的能源接入的情况下，大多数公司转而建设自己的自备电厂。随着公司急于开发其运营所需的能源基础设施，这一趋势预计将加速，与印度尼西亚的下游化战略一致。

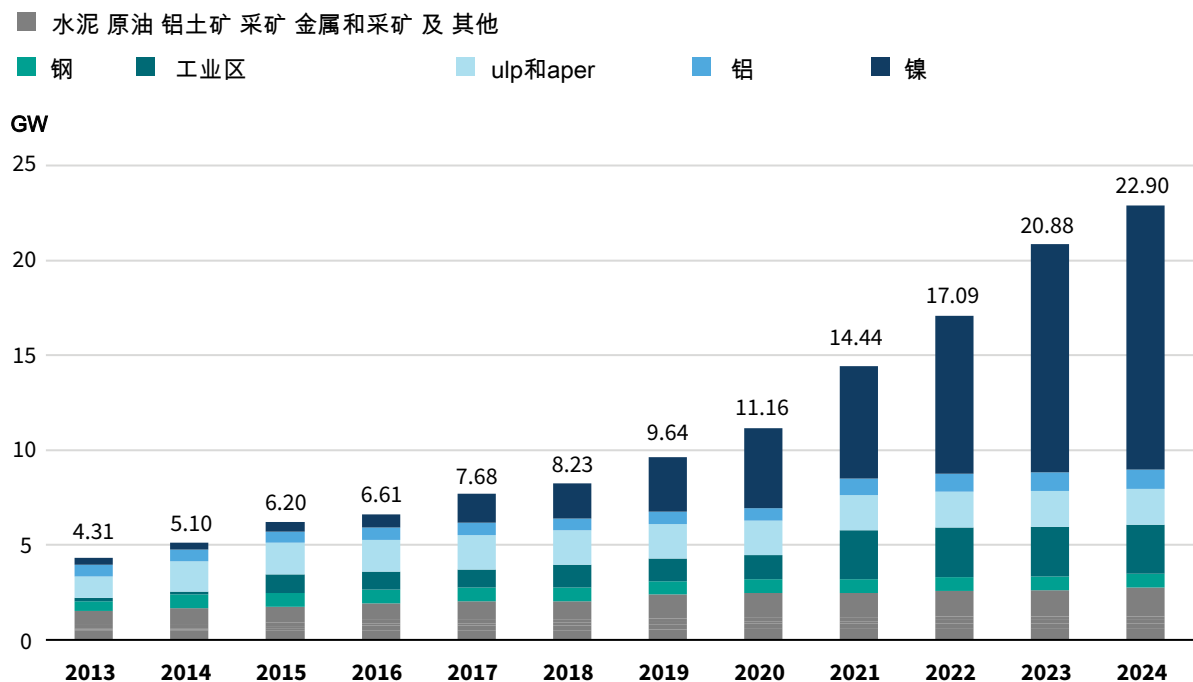
在过去的十年里，受镍行业驱动，特别是煤炭，被捕获的发电能力显著增加

RMI根据公开来源和政府重点关注小组讨论汇编了自备发电容量数据，如附表6所示。尽管官方政府数据提供了汇总信息，但并未公开披露资产层面的细节。相比之下，公开数据集通过按工厂、类型、容量和相关行业进行细分，提供了粒度信息。在2019年至2024年期间，自备发电容量扩大了约13.3吉瓦，比2019年水平翻了一番以上。这使2024年的容量达到22.9吉瓦，而2019年为9.6吉瓦。增长主要是由与关键原材料（CRM）相关的电力需求驱动的，特别是通过RKEFs进行的镍加工。

截至2024年，燃煤电厂占最大份额的自备发电容量，超过80%，约18.6吉瓦，完全在印度尼西亚国家电力公司PLN的管辖范围之外运营。它们还负责过去五年中新增部署数量最多。燃气发电厂紧随其后，为2024年的总容量贡献了2吉瓦。相比之下，自备可再生能源仍然边缘化，供应的自备电力不到5%，约1吉瓦。其中大部分来自水电，较小的贡献来自生物质能以及最近新增的太阳能光伏（PV）。

如果对自用燃煤电厂的186吉瓦估计是准确的，这将代表印度尼西亚全国燃煤机队的30%以上，突显了自用燃煤在国家能源和排放格局中的重要作用，而这一作用往往被忽视。

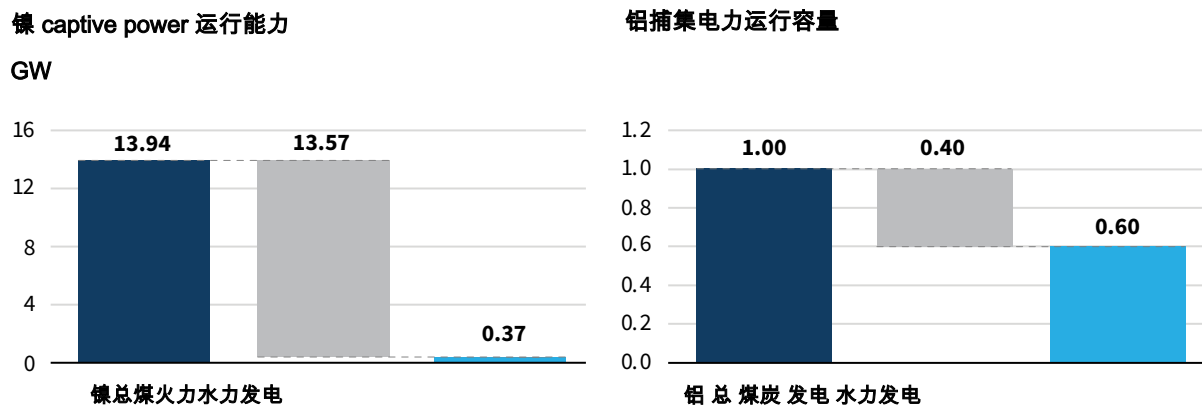
第六展览会 按工业部门划分的自备电站装机容量, 2013-24



注意：图中灰色区域标有“其他金属和采矿”以表明其属于不同类别 注意：图中灰色区域被着色以表示其被划分为一个独立类别。“其他金属和采矿”包含金铜等 t 品质 包括糖 化学品 肥料 石油和炼油 玻璃纤维 公共事业 和 包括黄金、铜等。“其他”包括糖、化学品、化肥、石油和炼油、纺织品、公用事业等。
RMI 快速来源：来自全球能源监测的公共可用信息，以及利益相关者 RMI 图形。来源：全球能源监测器（2025 年）公开信息、RUKN（2025 年）以及利益相关方
焦点小组讨论 焦点小组讨论

镍行业拥有最大的自备发电能力份额，2024 年总运行容量为 13.94 吉瓦。如展 7 所示，几乎全部产能，13.57 吉瓦为燃煤发电，仅 0.37 吉瓦来自水电。这种对煤炭的严重依赖突显了该行业对高排放电力系统的依赖，特别是在需要不间断电力的 RKEF 设施中。

镍和铝自备电厂总运营能力 镍和铝自备电厂总运营能力
截至2024年 截至2024年



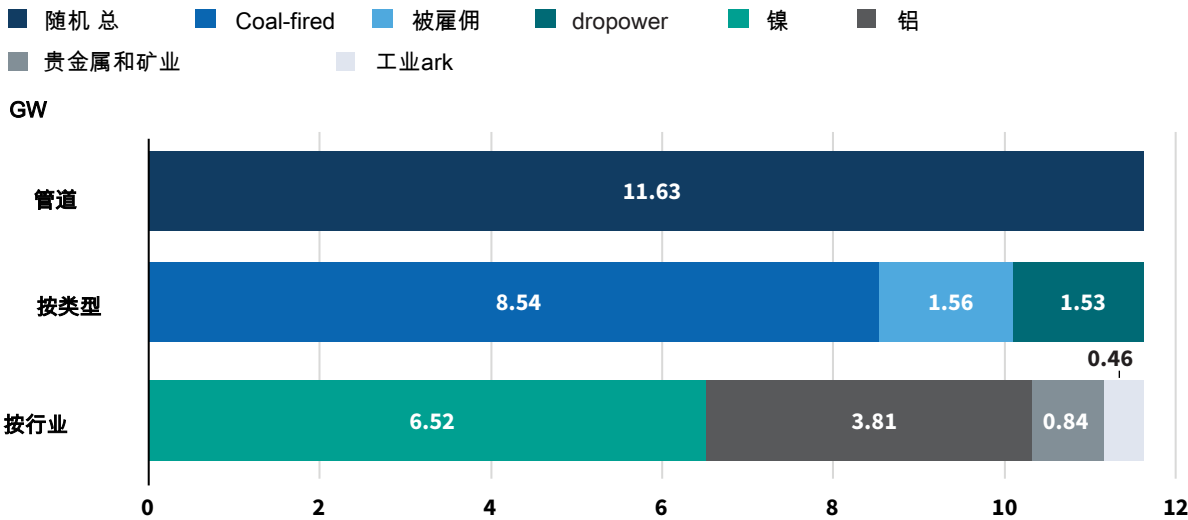
RMI 图形。资料来源：全球能源监测（2025 年）的公开信息、RUKN（2025 年）以及利益相关者关注 MI 快速来源：来自全球能源监测和利益相关方的公共可用信息 小组讨论 焦点小组讨论

相比之下，铝行业的自有产能相对较小，总计约为1吉瓦。铝行业的能源结构也更加均衡，其中0.4吉瓦来自煤炭，水电占比较大的0.6吉瓦。铝生产中水电的更广泛应用主要得益于北加里曼丹等地区拥有综合水电资产。

到2030年向镍和铝加工设施供能的受托电力展望

鉴于在建或规划中的加工设施数量，预计这两个行业的自备发电能力将增加。到2030年，镍加工将继续主导自备发电用户，因为更多的冶炼厂正在建设中，大部分位于苏拉威西和马鲁古。相比之下，铝则有望成为第二大自备发电用户，因为包括加里曼丹和廖内在内的地区正在建设新的氧化铝精炼和铝加工设施。

到2030年按工厂类型和相关的发电厂管道 被俘电站管道到2030年按电站类型和相关行业 行业



注意：管线指的是正在规划、已获许可或等待许可的建设项目
注意：“Pipeline”指的是在建、规划中、已获许可或等待许可的项目。“其他 金属和矿业包括黄金、铜以及类似的采矿业，涵盖工业园区和
“金属与矿业”包括黄金、铜和类似的采掘业。“其他”涵盖工业园区和 炼油厂
数据来源：来自全球能源监测和日出项目公开发表的信息
RMI图形。来源：全球能源监测器（2025年）公开信息、日出项目（2024年）
RUKN (2025)

如附表8所示，2024年至2030年期间，镍行业将新增6.5吉瓦自备电厂装机容量。这将使总装机容量在2030年达到20吉瓦，其中燃煤5.8吉瓦，水电0.5吉瓦，燃气0.15吉瓦。此外，铝行业将迎来第二大自备电厂扩张，装机容量将从2024年的1吉瓦增长至2030年的4.8吉瓦。新增装机将来自2.4吉瓦燃煤电厂和1.4吉瓦水电。随着这两个行业的扩张，获取可靠清洁能源的压力将加剧，使得能源选择成为协调国家工业增长与气候目标的核心问题。

权衡取舍：captive coal 默认值、可再生能源、电网连接及其限制

印尼煤炭作为自备电源的主导地位源于该国现行政策的宽松。燃煤自备电源可提供大规模可调度的电力，所需的基础设施投资相对较少，并受益于丰富的国内煤炭供应。此外，严格的排放法规的缺失和非约束性的碳价格机制并未有效阻止煤炭的持续使用。实际上，煤炭的成本优势仍然 largely unchallenged，允许高排放发电量 unchecked，尤其是在关键矿产行业。这种依赖伴随着重大的长期权衡，并可能破坏该国的气候目标。在 PLN 管辖之外运营的自备燃煤电厂被排除在国家电力规划之外，并且通常受到有限的监管监督。因此，它们面临锁定几十年高排放的风险，使该国难以实现其气候目标。

然而，尽管煤炭仍然是主要的选择，越来越多的注意力正转向低排放的替代品，如天然气和可再生能源。例如，天然气，从表面上来看，由于其燃烧排放低于煤炭，似乎是一种更清洁的替代品。然而，由于其供应链中的甲烷泄漏，它带来了重大的气候风险。甲烷是一种强效温室气体，其威力比二氧化碳高80多倍。CO₂ 在超过20年的时间里。RMI研究表明，即使泄漏率也²低至0.2%便可抹去天然气相对于煤炭的气候优势，使燃料同样具有危害性。⁹ 可再生能源，尽管它们提供了明确的环境效益，但在大规模工业应用方面面临着显著的障碍。这些障碍包括基础设施限制、缺乏监管激励以及全天候运营可靠性。对于企业而言，这造成了一个狭窄的竞争领域，在平衡排放、成本和电力确定性方面缺乏灵活性。

天然气和可再生能源的约束条件

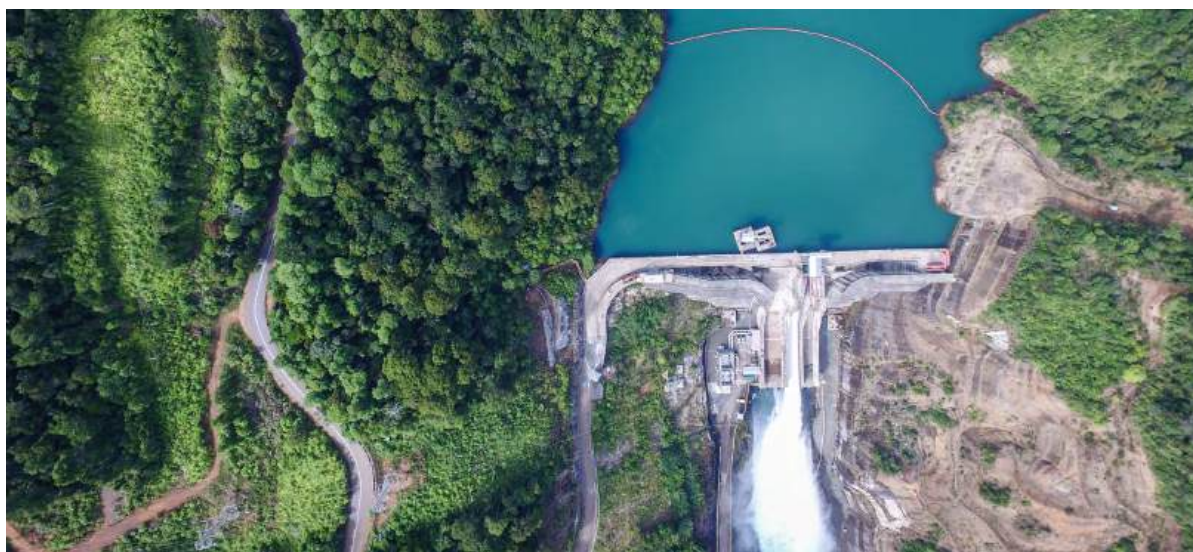
由于天然气供应受限以及支持性基础设施（如液化天然气管道）不足，燃气电厂的发展受到限制。几个主要的矿产冶炼项目得益于被纳入国家战略项目（PSN）而成功确保了其天然气供应。然而，缺乏天然气基础设施的地区其他生产商在获得稳定供应方面面临困难。此外，目前国内天然气市场优先保障电力部门以及政府国内市场义务中列出的几个行业。通过这项规定，政府将天然气价格上限设定为每百万英热单位6美元（MMBtu），并具体指明了可以利用这一价格点的优先行业，例如化肥、石化、钢铁和橡胶手套。¹⁰

由于采矿熔炉被排除在外，天然气生产商几乎没有责任向熔炉供货。印尼矿业行业协会（MIND ID）——印尼矿业国有控股公司——2022年就熔炉的特殊天然气定价发出的呼吁，凸显了如果没有政策指导，熔炉无法保证以可负担的价格获得天然气。¹¹ 政府逐步扩大了符合国内市场义务价格资格的行业清单，以提升竞争力。即便是一个非PSN项目

纸面上有资格，确保天然气涉及处理官僚主义并与政府企业和组织协调，这可能成为障碍。在国产天然气完全售罄的情况下，一些矿业公司不得不考虑进口液化天然气或接受更高的价格，这会降低其项目经济性。

可再生能源虽然技术上可行，但也面临重大障碍。莫罗瓦利和韦达湾等工业园区拥有巨大的太阳能潜力；然而，为了有意义地扩大太阳能光伏发电规模以用于运营，需要与电池储能系统（BESS）结合，以确保全天候运行的稳定和持续供电。这将显著提高平准化电力成本（LCOE），使其在与化石能源发电的竞争中处于劣势。此外，部署大规模太阳能光伏发电需要大片土地面积，这可能是一个限制因素，特别是在大多数土地为受保护森林且存在森林砍伐问题的偏远地区。

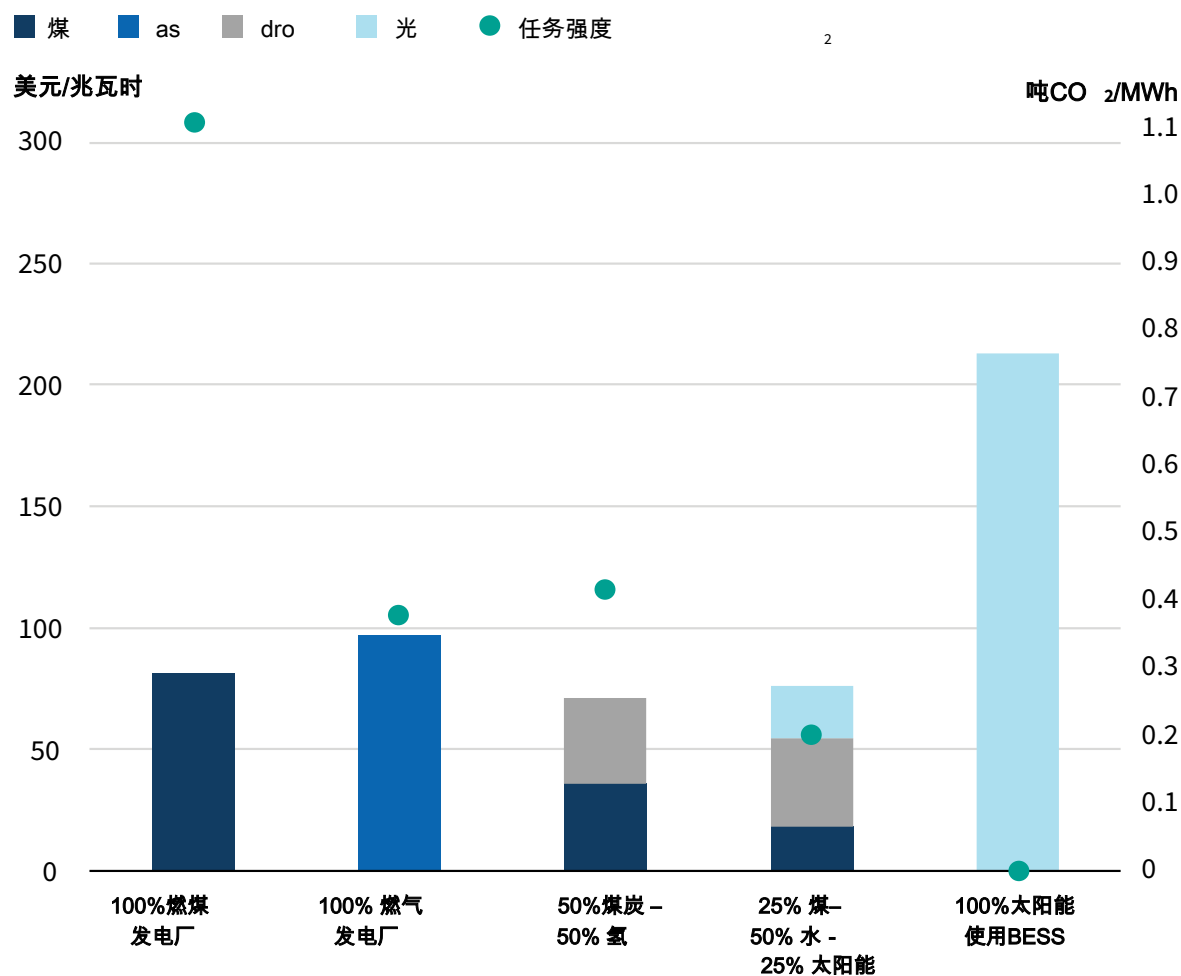
水力发电是另一种可提供全天候可调度电力的可再生能源选项。尽管苏门答腊和加里曼丹的一些地区拥有良好的水力资源，但它们通常远离工业中心或缺乏支持高容量运营所需的规模。尽管如此，少数公司，尤其是在北加里曼丹和中部苏门答腊，已经证明了使用大型水力发电为采矿和冶金运营供电的可行性。这些案例表明，当可行时，水力发电可以显著减少排放足迹。然而，由于地理和后勤限制，水力发电可能仍然是一种有针对性的解决方案，仅在适合的资源可供使用的特定地点才可行。



比较经济学：LCOE的关键要点

RMI分析表明，在苏拉威西岛的镍冶炼厂中，100兆瓦（MW）的厂内煤炭可以通过混合解决方案进行经济替代（参见附件9）。对于煤炭价格为每吨100美元的100兆瓦亚临界燃煤电厂，其平准化度电成本（LCOE）约为每兆瓦时（MWh）81美元，排放强度为每兆瓦时1.1吨二氧化碳。如果使用天然气作为主要能源，并假设成本为每百万英热单位12美元（MMBtu）——并假设供应安全可靠且无甲烷泄漏——则LCOE会增加约20%，而排放强度会降低超过50%。重要的是要强调，即使甲烷泄漏率低至0.2%，也会显著削弱气候效益，可能会使天然气对环境的影响与煤炭一样有害。因此，如果选择使用天然气，就必须进行仔细的管理和监测₂的甲烷排放。

不同镍冶炼厂能源的LCOE和排放强度 针对自备电厂不同镍冶炼厂能源发电技术的LCOE和排放强度



注意：所有值均以人民币表达。成本假设基于《technolog Data》第5版。 注意：所有值均以2025年美元计价。成本假设基于2024版技术数据目录（MEMR），采用2030年的成本预测。燃煤电厂被建模为亚临界机组，使用煤炭 目录MM使用成本预测或e所需发电厂被建模为一个亚临界单元，煤100美元/吨，燃气电厂模型为燃气联合循环燃气轮机，燃气价格为12美元/吨 价格 o ton 和所需的燃气电厂被建模为联合循环燃气轮机，燃气价格为 o RMM和标准的假设分都没有使用rapid solution和价格假设没有甲烷泄漏

在太阳能光伏与储能系统完全协同利用的场景下，平准化度电成本上升至基准值的1.5倍以上，这主要是因为需要扩大太阳能发电容量和储能规模，以确保冶炼厂24/7工业负荷的持续电力供应。尽管成本更高，这种配置实现了接近完全的脱碳化，排放强度接近零。

整合太阳能、水力发电和现有化石能源的混合发电场景可能提供一条近期减少排放且保持系统可靠性的途径。这些配置可以提供比以煤为主的基线更具竞争力的LCOEs，主要归因于水力发电的低边际成本。然而，此类策略必须明确限制。在1.5°C对齐路径的背景下，不再有空间进行新的化石燃料基础设施投资，包括所谓的过渡角色中。任何混合方法都必须优先考虑可再生能源发电的快速提升，并仅将现有化石资产作为递减的备用电源，而不是作为结构性特征。

未来能源组合中的水电整合的可行性取决于基于水库系统的可用性，这些系统在许多地区仍然受到地理和环境限制。

这些混合情景下的排放强度也显著提高，通常在0.2至0.4 tCO₂/MWh之间，具体取决于可再生能源在混合能源中的比例。这表明，当水力和太阳能资源可用时，通过可再生能源-化石燃料混合实现部分脱碳可以提供成本节约和环保效益。²

最终，尽管使用太阳能光伏和电池存储实现完全脱碳在技术上可行，但由于高昂的资本和存储需求，对大多数冶炼厂运营来说仍然是成本高昂的。在短期内，集成太阳能、水电和化石燃料的混合解决方案为在保持系统可靠性的同时降低排放提供了一种更务实的方案。然而，这绝不能被视为新化石投资的理由。对化石发电的任何依赖都必须严格有时间限制，并结构化为随着更清洁、稳定的电源选项扩大而下降。

此外，混合配置也可以作为应对未来市场风险的策略性对冲。随着国际碳规制的收紧，工业生产商将面临越来越大的减排压力。同时，印度尼西亚不断发展的气候政策框架，例如排放交易机制，将对高排放运营施加越来越高的成本。今天投资于低排放发电系统可以使企业在这些监管变化中占据先机。然而，混合方法应仅被视为一种过渡性解决方案。与净零路径保持一致最终将要求全面转向无化石能源系统。

印度尼西亚计划将ETS扩展到自备燃煤电厂

2023年初，MEMR为电力行业推出了一项基于强度的ETS。第一阶段，涵盖2023-24年，覆盖了与电网相连的燃煤电厂。截至2024年第一季度，有146个燃煤电厂机组参与了ETS。对于计划于2025-27年进行的第二阶段，该计划将扩展到包括容量低于25兆瓦的燃煤电厂、燃气电厂、联合循环电厂以及未连接至PLN电网的自用燃煤电厂。

迈向电网集成：减少自用电力依赖

将工业需求接入电网是减少自备电源依赖的一种新兴途径。PLN的自备电源获取计划（PCAP）已经在将工业电力需求整合到国家电网方面树立了先例，特别是在爪哇，过剩供应已成为结构性挑战。¹² 通过pcap，pln向公司以溢价方式提供工业用电。然而，这一举措目前在电网基础设施成熟且电力过剩的几个地区仍然有限。

在RUPTL 2025–2034中，PLN为发电、输电和变电站提出了具体项目，以服务于高压工业客户。在众多提出的项目中，PLN以苏拉威西的近期行动为例。这些包括到2025年部署国家移动备用容量植物，例如移动燃气轮机单元，以服务于Bantaeng（南苏拉威西）、Andowia（北科纳韦，东南苏拉威西）和Pomalaa（科拉卡，东南苏拉威西）等重要的冶炼中心。通过部署这些

移动单元，每个容量从50至100兆瓦，直接靠近炼铝厂，PLN旨在最大程度地减少对大量新建输电基础设施的依赖。此外，预计到2027年，在苏拉威西岛将有大约1,200兆瓦的永久发电能力投入运行，以安全地满足炼铝厂日益增长的电力需求。

为进一步支持工业增长，特别是在苏拉威西南部，PLN正大幅扩大该地区的电力骨干网络。一项关键举措是沿南部走廊建设一条275千伏超高压输电线路。该线路是更广泛的苏拉威西超级电网计划的重要组成部分，从中央骨干线路延伸至计划于2028年竣工的新建班塔恩冶炼设施。这些基础设施项目体现了PLN将冶炼厂的巨大能源需求整合入国家电网的战略方法，如RUPTL 2025–2034中全面详细阐述的那样。

将熔炉并网需要同时在发电和网络扩展方面进行相当的基础设施投资。尽管RUPTL 2025–2034没有明确说明将熔炉接入电网的成本，但它估计在10年内满足整体需求（包括熔炉）的总投资成本约为2,780万亿印尼盾（约合1850亿美元）。鉴于巨大的资金需求，PLN承认它无法独立资助和建造所有与熔炉相关的设施；相反，它计划引入第三方投资者和合作。将高耗能熔炉并网面临着若干挑战，包括：

- **需求不确定性及投资风险：** 电解铝厂项目时间表及其连续性的不确定性带来了风险，因为基础设施必须在电解铝厂启动之前或同时发展。延迟或取消可能导致资产未充分利用。PLN通过要求在重大投资进行之前，电解铝厂项目必须做出坚定承诺来减轻这种风险。

- **技术挑战（电网稳定性）：** 冶炼设施具有独特的负载特性，如高耗能和快速的需求波动，这会扰乱电网稳定性。解决这些技术问题需要先进的电压控制和补偿设备。

- **项目执行与时间：** 满足激进的工业时间表很困难，因为许多冶炼厂打算在2025年至2027年之间开始运营，这压缩了PLN交付必要基础设施的时间表。PLN采用快速部署策略，包括提供租赁和移动工厂、搬迁闲置的发电能力以及加速项目实施。

总体而言，RUPTL 2025–2034 展示了 PLN 对支持印尼矿产资源下游化举措的全面和战略方法。通过显著扩大电力生产和输电基础设施，PLN 正在有效定位自身以供应冶炼厂快速增长的能量需求。然而，谨慎的风险管理对于应对这些雄心勃勃项目相关的潜在财务、技术和监管挑战至关重要，以确保电网发展的可靠性、可持续性和经济谨慎性。

面向镍和铝产业的竞争性脱碳电力路径

被俘煤炭：印度尼西亚脱碳政策中日益增长的矛盾

印尼的镍和铝产业在过去十年中实现了显著增长，这得益于国内需求以及全球供应链向更清洁技术的转型。然而，这种产业扩张增加了这些行业对自备燃煤电厂的依赖，尤其是随着新的冶炼厂不断投入运营。尽管印尼推行了煤炭发电脱碳的政策举措，但目前的监管框架，特别是第112/2022号总统条例，将连接到国家战略性项目以及产业综合体的燃煤电厂排除在外。虽然该条例要求这些自备燃煤电厂在运营10年内将排放量至少减少35%，并到2050年完全关闭，但它并未阻止近期的扩张，可能会将数十年的排放量锁定下来。

这在 RUPTL 2025–2034 中得到说明，其中包括大约 6.3 吉瓦的额外燃煤发电能力计划。¹³ 尽管目前尚不确定这些是否代表全新的项目，或是先前已批准但延迟的项目，但它们的纳入引发了关于第112号总统令的问题，该总统令此前承诺停止新建燃煤电厂的开发。与此同时，受控燃煤电厂的产能预计将进一步扩大，到2030年新增约8.5吉瓦的产能，将超过并网燃煤电厂的增量。这表明，尽管更广泛的政策承诺正在转向不再支持此类发电方式，受控燃煤正成为燃煤电厂增长的主要驱动力。如果不解决这一差距，工业扩张有风险因持续增长的燃煤依赖而受到损害。

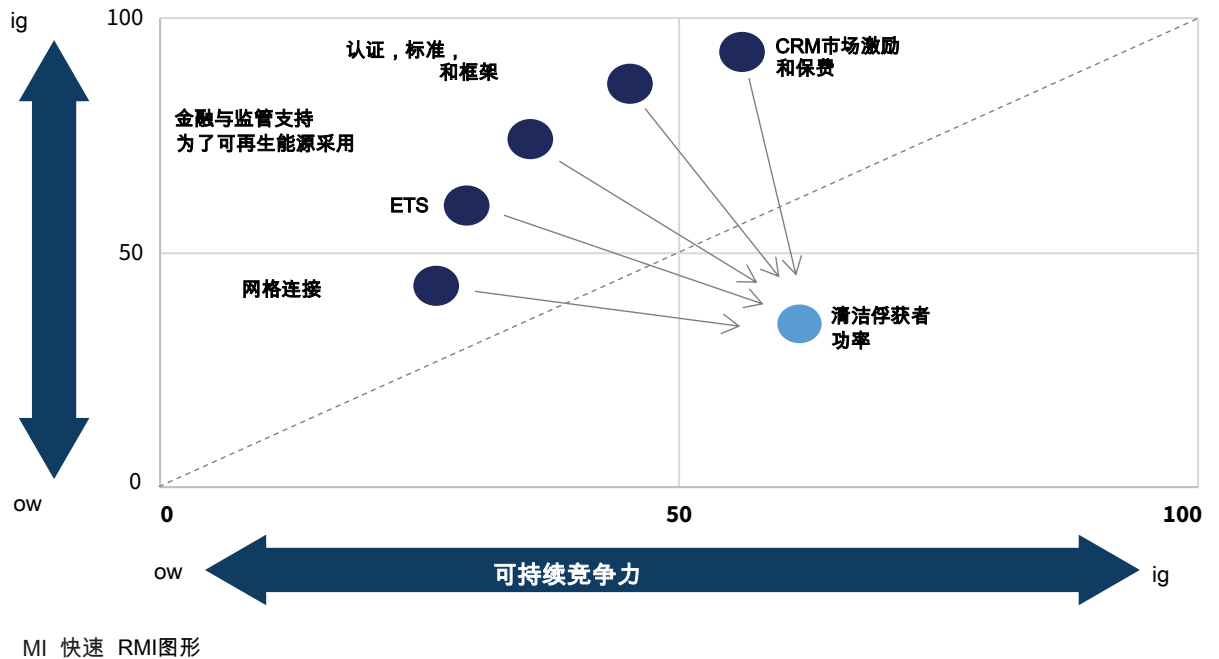
transitioning industrial power systems的挑战

因此，对镍和铝等蓬勃发展的行业中的自备煤电厂进行脱碳至关重要。这需要应对复杂挑战：蓬勃发展的关键矿产行业、清洁自备发电缺乏市场激励、电网基础设施不足以及清洁能源选择有限。消除这些障碍不仅对于推动系统性变革至关重要，而且对于确立该国在全球优先考虑低碳产品的市场中的地位也至关重要。

对更加负责、可验证和成熟的碳排放核算实践的需求 日益增长

随着印尼矿产资源加工业迅速扩张，印度尼西亚的CRM生产商面临越来越大的压力，需要展示明确的努力来追踪、管理和减少其环境足迹。随着中国国内需求放缓，拓展出口市场——尤其是欧盟——要求企业加强其排放验证流程。与此同时，公众对镍生产商的审视加深，凸显了在环境绩效方面需要更完善的可持续性披露。随着印尼推进碳交易机制，碳核算对透明度和竞争力都至关重要，以支持合规监管和有效市场参与。碳核算工具已大量涌现，但必须严格、经过验证并以战略意图来应用，才能驱动有意义的减排。

图10 为镍和铝工业健康和系统脱碳的举措系统脱碳的路径



MI 快速 RMI图形

图10展示了支持印度尼西亚清洁自备发电的几种途径。电网扩展等举措对于减少工业对自备燃煤电厂的依赖至关重要。PLN已启动扩展输电网络至主要炼铝中心规划工作；然而，仍存在显著的技术和协调挑战。这些挑战包括管理工业增长固有的需求不确定性，确保炼铝负荷在更广泛的电网系统中的稳定性，以及将电网发展时间表与工业设施建设同步。

短期替代方案，如燃气发电，必须谨慎对待。天然气供应链中的甲烷泄漏会带来严重的气候风险，可能抵消煤炭的任何减排收益。如果使用燃气，必须进行严格监管，拥有完善的基础设施、透明的泄漏监测以及反映其真实气候成本的市场信号。类似地，结合可再生能源与化石燃料的混合系统可能会提供暂时的减排效果和可靠性优势，尤其是在有水力发电可用的情况下。然而，这些必须被明确视为临时安排，而不是长期脱碳路径的结构性组成部分。

为了使可再生能源在工业部门有效规模化发展，一个关键的技术挑战在于将可变可再生能源与储能系统结合，以确保全天候供电。降低可再生能源-储能系统的成本对于提高竞争力至关重要。同时，必须解决监管瓶颈。简化许可审批、加快土地审批速度、并确保政策一致性对于释放大规模投资和部署至关重要。

建立旨在促进清洁工业增长的市场激励和机制将是关键

任何工业脱碳战略都围绕着及时转变化石燃料，同时加速可再生能源整合。这需要通过更强大的市场激励、碳定价机制、电网和储能基础设施准备就绪以及能够让企业获得越来越多清洁、可负担电力的制度路径来解决结构性障碍。

除了基础设施和价格改革之外，直接电力购买协议（dppa）和排放交易体系（ets）等支持机制可以提供额外的手段来加速工业脱碳。直接电力购买协议允许企业通过电网从场外生产商签订可再生能源电力合同，提供更大的灵活性和清洁能源的获取途径，特别是在现场发电受限的地区。这种模式已经在几个东南亚国家（包括越南和马来西亚）证明是有效的，这些国家已经试点了直接电力购买协议框架，以实现企业规模的可再生能源采购。在印度尼西亚，直接电力购买协议的监管框架仍处于起步阶段，但推进它将是扩大市场准入和投资者信心关键的一步。

同时，PLN正在探讨电力轮转的运营和财务影响，电力轮转作为场外可再生能源采购的关键推动者，已在RUP TL 2025–2034中提及。该公用事业公司已注意到，关于《新能源法（草案）》和《第30/2009号电力法》修订的持续讨论可能引发潜在的合规和财务风险，特别是电力轮转如何影响PLN的业务流程和收入来源。尽管这些担忧是合理的，但电力轮转仍然是解锁更广泛可再生能源接入的关键推动者，必须通过平衡的监管设计来解决。与此并行，ETS可以奖励经核实的减排量，并创造价格信号以激励更清洁的工业运营。这些市场机制共同可能成为支持印尼工业部门长期脱碳的政策包的一部分。

一个案例研究：中国自备电厂和铝行业的ETS实施

中国实施了一个基于市场的碳排放交易体系（ETS），以帮助实现其气候目标，即到2030年排放达峰，到2060年实现碳中和。中国的ETS被设计为一个基于强度的、基于产出的分配体系，而不是一个固定的绝对上限。在其早期阶段，中国的国家ETS监管了电力部门的排放，该部门包括发电、热电联产和由工业运营的自备电厂。¹⁴

2025年前，铝行业并未受国家碳排放交易体系直接监管。然而，为这些炼铝厂提供动力的发电厂受到监管。因此，铝行业很大一部分通过电力行业间接受到碳排放交易体系的约束。历史上，中国的铝冶炼依赖自备煤电获取能源。到2023年，大约70%用于铝冶炼的能源来自煤炭——即约400太瓦时的燃煤发电厂。¹⁵

2025年，中国正式将ETS覆盖范围扩大到铝冶炼厂自身。¹⁶根据新规，铝企必须核算其冶炼过程的直接排放、全氟化合物气体和间接排放。实际上，这意味着铝冶炼厂现在有两套合规义务：其自备电厂必须上缴发电排放和冶炼设施相关排放的配额。

随着这一强化努力，中国铝业正迈向低碳化发展。已显现出若干可观察的趋势，例如效率提升以及燃料和能源来源的转换。尽管碳价仍然相对较低，但碳排放交易体系（ETS）已帮助强化了国家推动企业淘汰自备燃煤电厂并提高运营效率的计划。

同时，数据报告和核证至关重要。印度尼西亚应投资建立一个可信的排放测量、报告和核证系统，并鼓励第三方审计。以全球最佳实践为蓝本的认证机制可以帮助识别和奖励具有可证实更低排放的生产商。这些工具对于获得可持续金融、出口市场和新兴绿色采购框架（例如欧盟的CBAM和电池护照）至关重要。如果没有这些系统，印度尼西亚的生产商可能会发现自己被排除在高价值供应链之外。

确保公正转型，并利用低碳产品的市场机遇

将工业电力系统脱碳不能以牺牲工人、社区或环境公平为代价。印度尼西亚的公正能源转型伙伴关系强调了这一方法，以支持摆脱煤炭的公平转型，包括劳动力再培训、清洁能源行业的就业创造和社区韧性计划。采矿和加工行业的劳动力影响必须主动解决，因为转向低碳技术可能会导致工人

显著改变技能要求。结构化再培训计划、有针对性的劳动力规划以及通向新兴清洁产业的清晰途径对于在推动脱碳的同时维持经济稳定至关重要。此外，必须优先进行有意义的社区参与，以最大程度地减少社会经济干扰，并将当地利益相关者的声音纳入决策过程。解决环境公正问题，特别是在重工业区，与空气和水污染相关的风险，也是至关重要的。加强监管框架，以及诸如公正能源转型伙伴关系等倡议，可以确保印度尼西亚的工业脱碳具有包容性、公平性和环境责任感，有效地保护脆弱社区免受不成比例的成本。

最后，低碳产品的市场机会正在加速。虽然全球绿色溢价仍在发展中，但主要买方开始提供长期采购协议和对可持续材料的优惠定价。例如，在钢铁行业，RMI已经开发了一个可持续钢采购平台，该平台汇集企业需求，并帮助为直接和间接买方建立合适的市场机制。¹⁷ 在铝业领域，先锋联盟正在为近零铝提前动员需求，全球制造商承诺采购低碳材料。¹⁸ 这些举措反映了一个更广泛的趋势：不断增长的市场信号，奖励那些能够验证减排并展示环保表现的生产者。

印度尼西亚的一些玩家已经对此转变做出响应。几家镍和铝生产商已开始使用水力发电来制造低碳产品，这表明该国已准备好进入绿色金属领域。然而，要让整个行业发生更广泛的转型，创造必要的条件至关重要。这些条件包括政策清晰、可靠地获取清洁能源、排放验证基础设施，以及支持社区和工人以确保公正过渡。通过这些领域推进，印度尼西亚不仅能够加强其作为全球最大镍供应商和重要铝生产商的领导地位，还能成为可持续关键矿产生产领域的全球先锋。



尾注

- 1 镍 美国地质调查局，2024， <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2025/mcs2025-nickel.pdf> .
- 2 全球关键矿产展望2024 国际能源署，2024， <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ee01701d-1d5c-4ba8-9df6-abeeac9de99a/GlobalCriticalMineralsOutlook2024.pdf> .
- 3 潘杜·塞蒂阿布迪 印度尼西亚铝土矿和铝市场展望 Petromindo，2023， https://www.petromindo.com/storage/files/research/Indonesian-Bauxite_and_Aluminum_Outlook.pdf .
- 4 Mela Syaharani，“今年创纪录的铝产量达成265万吨，”印度尼西亚矿业协会，2024年12月30日， <https://ma-api.org/detail/news/mining/inalum-cetak-rekor-produksi-aluminium-tahun-ini-capai-265-ribu-kilo-ton> .
- 5 “今年压铸铝纪录产量，达到265万吨，”2024。
- 6 印度尼西亚镍业脱碳路线图，世界资源研究所，2025， <https://wri-indonesia.org/id/berita/kementerian-pb-nbappenas-dan-wri-indonesia-memastikan-integrasi-dekarbonisasi-industri-nikel> .
- 7 “印度尼西亚排放量，”国际能源署，2025年6月8日访问 <https://www.iea.org/countries/indonesia/emissions> .
- 8 “印尼HPAL的崛起与持续——它还能继续吗？” Wood Mackenzie，2023年4月4日， <https://www.woodmac.com/news/opinion/rise-of-indonesian-hpal/> .
- 9 “现实检查：天然气真正的气候风险”，RMI，2023年7月13日， <https://rmi.org/reality-check-natural-gas-true-climate-risk/> .
- 10 “总统第121号令2020年，”2020年12月29日， <https://peraturan.bpk.go.id/Details/156888/perpres-no-121-tahun-2020> .
- 11 “MIND ID 询问熔炼厂的燃气和电力特殊价格，”能源世界，2022年5月25日， <https://www.dunia-energi.com/mind-id-minta-harga-gas-dan-listrik-khusus-untuk-smelter/> .
- 12 埃尔米娜·哈恩，“PLN启动获取俘获电力服务计划”，RRI，2024年8月21日， <https://www.rri.co.id/bisnis/19693/pln-gencarkan-layanan-program-akusisi-captive-power> .
- 13 2025—2034年电力供应企业发展规划 能源与矿产资源部，2025。 https://gatrik.esdm.go.id/assets/uploads/download_index/files/06524-bahan-dirut-pln.pdf .
- 14 “中国国家温室气体排放交易体系” 国际碳行动伙伴关系,最后访问于2025年6月9日 <https://icapcarbonaction.com/en/ets/china-national-ets#:~:text=Sectors%20and%20thresholds> .

15 中国铝业：脱碳化挑战与机遇 过渡亚洲，2025年4月17日， <https://transitionasia.org/the-chinese-aluminum-sector-challenges-and-opportunities-for-decarbonisation/> .

16 中国正式扩大国家碳排放交易体系至水泥、钢铁和铝行业，” 国际碳行动伙伴关系，2025年4月10日， <https://icapcarbonaction.com/en/news/china-officially-expands-national-ets-cement-steel-and-aluminum-sectors#> .

17 零排放钢铁的挑战 RMI，2025年6月8日， <https://rmi.org/our-work/climate-aligned-industries/sustainable-steel-buyers-platform/> .

18 首动联盟——铝承诺，世界经济论坛, 2022, https://www3.weforum.org/docs/WEF_First_Movers_Coalition_Aluminium_Commitment_2022.pdf .

丽兹基·福亚尼安托，安德ika·阿克巴尔·赫马万，布莱恩·奥哈龙，温尼·丽兹基宁盖尤，和拉赫马特·塞迪阿迪
推进清洁金属：印尼镍和铝工业中的自备电力脱碳化，RMI, 2025, <https://rmi.org/insight/advancing-clean-metals-decarbonizing-captive-power-in-indonesias-nickel-and-aluminum-industries> .

rmi重视合作，旨在通过分享知识和见解来加速能源转型。因此，我们允许利益相关方通过知识共享cc by-sa 4.0许可协议来参考、分享和引用我们的工作。 <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/> .



所有使用的图片均来自iStock.com，除非另有注明。



RMI创新中心
22830 两河路 巴尔扎斯, 科
罗拉多州 81621

www.rmi.org

© 2025 RMI。版权所有。落基山研究所
® 和 RMI® 是注册商标。