

白皮书03 · Cameroon Steel · 中文摘要版

电炉炼钢是中部非洲的正确路线

路线选择：为何先以废钢和进口DRI/HBI、再以喀麦隆精矿生产的直接还原铁为原料的电炉，比高炉更能兼顾资本、灵活性、排放和建设速度。中文摘要版。

文件信息

编号	CS-WP-03
版本日期	2026年10月10日
状态	第一版（摘要版）
密级	公开
编制单位	Cameroon Steel
系列	Cameroon Steel公开白皮书系列，第03份（共10份）
范围	炼铁与炼钢路线、含铁原料、直接还原与矿石质量、电弧炉炼钢车间、长材轧制、产品质量、自动化、分期路径与技术风险
证据截止日期	2026年10月10日
语言	英文（全文）、法文（全文）、中文（摘要）；如有差异，以英文原版为准
版本说明	本文完整翻译执行摘要，并对第1至第11章逐章摘要；附录A至D（方法、术语、来源、数据表）见英文版和法文版
资料来源	正文中的[S-id]标记对应全文版（英文版和法文版）附录C的来源清单
项目数据	Cameroon Steel参考配置RC-1（规划估算，2026年10月10日版）的规划值、目标值或指示值；不提供任何投资金额
利益声明	本文由正在克里比筹建钢铁厂的Cameroon Steel发布，旨在为公共讨论提供参考；其分析独立于任何商业要约，所有数据均注明来源或标明其状态。

阅读说明。每个数字均注明单位、年份和来源标记（如[S03]）。图表标有状态标签：“来源”（取自己发表来源）、“推算”（本公司基于有来源数据的计算，详见全文版附录A）、“假设”（明确说明的规划假设）或“示意”（示意图或情景，而非预测）。生成图像标注为“示意图”，并非任何项目的照片。

本文不是什么。本文不是可行性研究、设计基础、要约或承诺。项目数值为规划数据，将随工程设计、审批和融资的推进而调整。

目录

执行摘要：先建能够接受任何铁源的电弧炉	4
第1章·钢铁如何生产：两种炼铁方式，两种炼钢方式	8
第2章·路线比较：电炉在碳排放、规模和速度上胜出	9
第3章·含铁原料：喀麦隆缺的是铁，而不是轧制能力	10
第4章·直接还原与矿石质量：喀麦隆的铁需先建选矿厂和球团厂	11
第5章·电弧炉炼钢车间：电力系统一并设计，一座40吨级电弧炉可支撑一期的大部分产量	12
第6章·长材轧制：热坯直送和感应加热使一期全电化	13
第7章·热带建筑的钢筋质量：延性和认证比强度更重要	14
第8章·数字化与自动化：控制系统是工艺而非附加项	15
第9章·分期路径的应用：RC-1分四步达到年产100万吨	16
第10章·技术风险与决策标准：在投入前化解重大风险	17
第11章·证据缺口：尚不了解的情况及其解决方式	18
附录A·术语表	19

执行摘要：先建能够接受任何铁源的电弧炉

对中部非洲的新钢铁生产商而言，电弧炉先以废钢和进口直接还原铁（DRI）或热压块铁（HBI）为原料，日后再改用喀麦隆精矿生产的直接还原铁，能够在资本强度、灵活性、排放和建设速度之间取得最佳平衡。电弧炉的CO₂排放仅为高炉的一小部分，可按每期数十万吨分步建设，无需等待矿山、球团厂和天然气合同即可投产，同时为使用喀麦隆本土铁资源保留通道。高炉路线适合以炼焦煤为支撑的超大型联合钢厂，而喀麦隆并不具备这些条件。本文阐述支撑这一结论的技术选择，并将其应用于Cameroon Steel规划在克里比港综合工业区姆博罗（Mboro）建设的钢铁综合体。

37至71%

电炉路线吨钢CO₂排放较高炉低37%至71%（世界钢铁协会，2024年数据）

120万

吨/年
年产100万吨炼钢车间所需含铁原料，约为喀麦隆废钢回收量的十倍（推算）

62.2 / 68

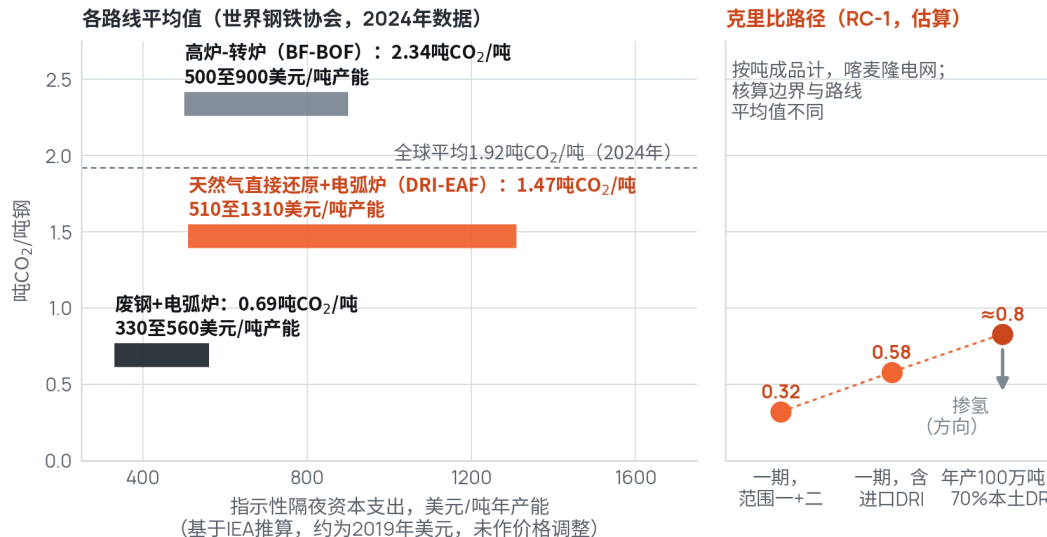
% Fe
姆巴拉姆（Mbalam）直运矿品位与其直接还原级试验精矿品位对比

55

兆伏安
一期最大需量（假设），在园区线路初期100兆瓦的范围之内

与高炉相比，电炉路线吨钢CO₂排放降低37%至71%

资本支出区间为2019年美元基准；高炉区间仅适用于以炼焦煤为基础、年产数百万吨的规模



推算 图ES.1 三条主要工艺路线的CO₂强度和每吨产能的指示性资本支出（2019年美元），以及本文提出的分期路径的估算排放强度。
资料来源：世界钢铁协会，Sustainability Indicators 2025，2024年数据[S01]；资本支出区间根据国际能源署（IEA）年化成本推算，约为2019年美元，未作价格调整[S02]；路径强度取自Cameroon Steel参考配置RC-1（规划估算），按吨成品计，核算边界与路线平均值不同[S03]；方法见全文版附录A。

结论概要

各种炼钢路线的根本区别在于铁从何而来。高炉以焦炭还原矿石生产铁水，规模为每年数百万吨；天然气基直接还原竖炉以天然气或氢气将高品位球团还原为固态铁，单个模块年产25万至250万吨[S04]；电弧炉则可熔化任何含铁原料，包括废钢、DRI、HBI或生铁。因此，电炉炼钢车间可以先使用外购含铁原料投产，以后再增加本土炼铁环节，而无需更换电弧炉、连铸机或轧机。高炉路线不具备这种分步推进的可能。

十项结论

- 01

选择工艺路线，就是选择含铁原料。轧制、连铸和精炼是所有路线的共同环节，区别在于铁的获取方式。喀麦隆缺的是铁，而不是轧制能力：钢坯已成为该国最大的单项钢材进口商品，2023年进口16.14万吨，是2019年的三倍[S05]，而国内轧制能力已超过需求[S06]。
- 02

电炉路线使吨钢CO₂排放降低37%至71%。根据世界钢铁协会2024年路线平均值，高炉-转炉路线每吨粗钢排放2.34吨CO₂，DRI-电弧炉路线1.47吨，废钢电弧炉路线0.69吨[S01]。喀麦隆电网以水电为主，2024年电网排放因子约为226克CO₂/千瓦时[S07]，电炉路线的优势更加明显。
- 03

区分各路线的不是每吨资本支出，而是不可分割的最小投资规模。按基于IEA推算的2019年美元基准，新建高炉钢厂的指示性资本支出约为每吨产能500至900美元，天然气DRI-电弧炉为510至1310美元，废钢电弧炉为330至560美元[S02]；2020至2026年公布的项目预算包含轧机和场地工程，水平更高，约为每吨660至1560美元（第2章）。但高炉只有在年产数百万吨时才具经济性，而非洲目前订购的炼钢车间和轧机规模约为年产30万吨[S08, S09]。
- 04

感应炉和熔融还原不适用。感应炉精炼能力差；印度以DRI为原料的感应炉钢大多超出本国标准和ASTM标准的磷含量上限[S10]。熔融还原仍需配套转炉，依赖煤炭，且仅在少数地点实现商业化运行[S11, S12]。
- 05

年产100万吨的炼钢车间每年需要约120万吨含铁原料。Cameroon Steel的参考配置RC-1显示，一期约需36.3万吨，全面建成后需121万吨（推算）[S03]。喀麦隆每年回收的废钢约在10万吨量级（推算），且已被现有钢厂使用；唯一一项全国性研究估计的废钢年产生量为5.3万至6.18万吨[S13]。因此，RC-1假设本厂每年只能采购约3万吨本土废钢（区间0至6万吨）[S03]。
- 06

一期应以废钢和进口DRI或HBI为原料。RC-1假设一期炉料中DRI或HBI约占30%，区间为20%至50%[S03]。HBI是实际可行的贸易形态，因为它只需表面通风即可海运，而冷态DRI必须在惰性气体保护下运输[S14, S15]。每种含铁原料至少两家供应商并配备有盖仓储，是最低要求。
- 07

喀麦隆矿石须先经选矿厂和球团厂处理，才能供竖炉使用。直接还原要求矿石铁品位至少为64%[S16]，贸易中的直接还原级产品品位通常为67%至68%[S17]。姆巴拉姆JORC储量的铁品位为62.2%，二氧化硅和氧化铝合计7.3%[S18]；对姆巴拉姆铁英岩（itabirite）的试验得到了品位68%的直接还原级精矿[S19]。该产品目前仅停留在试验规模。
- 08

天然气和氢气决定本土炼铁的推进节奏。年产100万吨的DRI模块每年约需90亿立方英尺（9 bcf）天然气，约为喀麦隆2025年产量的12%（推算）[S20, S21]。氢能就绪的竖炉可在天然气与氢气任意比例下运行，炉体无需根本性改造[S22]；但100万吨DRI若完全使用氢气，每年约需27亿千瓦时电力（推算），因此掺氢必须与新增低碳电力同步推进。
- 09

一座40吨级电弧炉可支撑一期的大部分产量；达到30万吨名义产能需要很高的可用率或更大的变压器。按RC-1规划值每吨钢水450千瓦时计，每炉约40吨，冶炼周期约55分钟；按上限规划值约490千瓦时（炉料中DRI或HBI占30%）计，约59分钟。名义产能所需的约8000炉将占用全年8760小时中的约7300至7900小时；按年运行7000至7700小时这一现实假设，一期可生产约27万至30万吨成品（推算）[S03]。电弧炉提供的是可调度负荷，即将熔炼安排在电网高峰之外，而不是可中断负荷。电弧炉会造成电压闪变；其他钢筋厂曾在监管压力下加装STATCOM补偿装置[S23, S24]。一期最大需量约55兆伏安（假设），在园区225千伏线路初期100兆瓦的范围之内[S03, S25]。
- 10

质量与数据是产品的组成部分。喀麦隆钢筋标准NC 236为强制性标准且得到执行[S26, S27]。配备钢包精炼炉和在线淬火自回火轧机的电弧炉，能够生产符合NC 236、BS 4449和ASTM A615的高延性、可焊接钢筋[S28, S29, S30]。从炉次到钢筋捆的全程追溯、能源管理（通过ISO 50001认证的工厂第一年节能约4%[S31]）以及按产品计量的CO₂排放，共同构成完整的设计。

分期路径在克里比的应用

Cameroon Steel的参考配置RC-1将该路径分为四步[S03]：

- **一期（规划）**：一座40吨级电弧炉及钢包精炼炉、一台钢坯连铸机、钢坯感应加热装置和一条棒线材轧机；名义产能每年30万吨，预计持续产量每年27万至30万吨，产品为钢坯、钢筋（8至32毫米）和线材（5.5至12毫米）。目标于2029年在取得环境证书后开工，2030年下半年首炉出钢，2031年爬坡。
- **二期（指示性）**：第二条熔炼线和轻中型型材轧机，年产约20万吨角钢、槽钢、扁钢，暂定2032至2034年。
- **三期（指示性）**：炼钢扩能及重型型材轧机（H型钢），2034年后，产能达约100万吨，视市场和融资而定。
- **预留（指示性）**：为喀麦隆矿石预留一个年产约100万吨DRI的氢能就绪直接还原模块，时间更晚，视矿石、天然气和审批情况而定。

一期炼钢车间生产钢坯，产品可在轧材（线材和钢筋）与商品钢坯之间灵活分配；商品钢坯销往现有再轧厂，这些工厂的需求中本地废钢仅能满足约40%，2023年进口钢坯16.14万吨[S05, S32, S33]。缺口不在钢筋：国内钢筋产能约62.7万吨（原始资料印作627吨，此处按千吨理解，见白皮书04第5章），是约18万吨需求的三倍以上[S06]。因此，一期产量的目标是替代进口钢坯和线材并出口中部非洲经济与货币共同体（CEMAC）市场，而不是向已饱和的市场增加钢筋。白皮书04阐述市场证据，并给出克里比钢坯与进口到岸钢坯的指示性成本比较。

一期全部使用电力：感应加热使工厂在二期型材轧机之前无需天然气[S03]。一期范围一和范围二排放估计约为每吨成品0.32吨CO₂（按电力上限值为0.33吨），计入进口DRI的上游排放后约为0.58吨（推算）[S03]。全面建成需要园区线路后期330至400兆瓦的供电能力[S25, S34]。本文不提供任何投资金额，相关金额将通过工程设计和融资确定。

先建能够接受任何铁源的电弧炉；待矿石、天然气和电力条件成熟，再增建生产喀麦隆本土铁的工厂。

Cameroon Steel，技术路径

其他方案为何不足取

每一种替代方案都至少在资本、灵活性、排放和速度四项标准中的一项上不达标。高炉钢厂需年产数百万吨才能高效运行，需进口炼焦煤，且碳强度在所有路线中最高；它必须在产出第一吨钢之前投入全部资本。没有炼钢车间的再轧厂建设快、投资少，但会进一步增加本已过剩的轧制能力[S06]，并使工厂依赖进口钢坯，而钢坯恰恰是最需要替代的进口商品[S05]。在监管机构严格执行质量要求的市场中[S26, S27]，感应炉若不增加精炼环节，难以稳定满足现代钢筋标准对磷含量和延性的要求[S10]。先建直接还原厂，则会使投产时间取决于尚不存在的选矿厂、球团厂和天然气合同。只有分期电炉路线能够在数年内投产、分步投入资本、以成熟设备满足质量标准，并为使用喀麦隆本土铁保留通道。

决策标准

该路径的主要技术风险集中在与电网、含铁原料市场、矿山和天然气供应的接口上。每项风险都可以在相应资金投入之前得到降低。第10章提出四道关口，每道关口都以证据而非日期为开启条件：

1. **一期投资**：确定的225千伏接入及获认可的闪变研究；每种含铁原料两个来源；NC 236及国际牌号的认证路径；吨钢电耗和电弧炉可用率的性能保证；环境与社会影响评估获批，并在贷款方董事会批准前按其要求的期限公开披露。
2. **二期**：一期连续十二个月达到设计收得率、能耗和产量；型材需求得到确认；电力容量留有余量。

3. **三期：**园区线路后期供电已签约；重型材市场得到验证；落实每年120万吨含铁原料计划。
4. **本土DRI：**铁品位至少67%的直接还原级精矿通过中试验证；球团供应落实；天然气储量经审计并签订长期合同；采用带CO₂计量的氢能就绪设计。

仍不确定的事项

本文明确列出尚不掌握的信息（第11章）。最重要的未决问题包括：工厂接入点的电网短路容量；喀麦隆在产气田的剩余储量；直接还原级选矿厂和球团厂是否建设、何时建设、建在何处；克里比实测的大气腐蚀性；以及一期运营期内进口HBI和废钢的合同价格。这些不确定性都不支持改选其他路线，而是都支持分期、设关口的推进方式。

该路径对公共部门合作伙伴的期待

分期路径取决于并非由Cameroon Steel单方面作出的决定。其中六项决定影响其时间安排和对国家的价值。

- **确定的电网接入和明确的电能质量规则。**园区225千伏线路和变电站[S25]须投入运行，工厂的接入协议须规定其补偿装置设计所要满足的闪变和谐波限值。
- **工业用天然气框架。**在建设任何直接还原模块之前，国家、国家石油公司和生产商须明确二十年或更长期限内工业用户天然气的分配、定价和税收安排[S21, S35]。
- **矿山与钢厂之间的桥梁。**Cameroon Mining Company采矿协议中15%本地加工的条款[S36]，只有在直接还原级精矿得到验证并完成造球后，才对炼钢具有价值。联合中试计划是合乎逻辑的第一步。
- **散装含铁原料的港口能力。**一期每年将经克里比进口约35.1万吨含铁原料和消耗品（推算）[S03]。矿石码头已于2025年11月4日签署谅解备忘录，克里比自治港（PAK）总经理在2026年3月预计其将在五至六年内建成[S37, S38]；该码头对钢厂与对矿山同样重要，一期将使用现有码头。
- **持续执行产品标准。**强制性钢筋标准及其执行[S26, S27]保护投资于质量的生产商，也保护建筑物中的公众。
- **技能。**喀麦隆的工程院校没有专门的冶金系[S39]；从一期开始就需要与院校和技术供应商合作开展钢铁人才培养计划。

这些决定并非每一步的前提条件。但它们共同决定该路径从外购铁过渡到喀麦隆本土铁的速度。

本文结构

第1章为业外读者说明钢铁生产方式。第2章比较五种工艺路线。第3章分析含铁原料和喀麦隆的废钢缺口。第4章讨论直接还原和矿石质量。第5章和第6章介绍炼钢车间和轧机。第7章论述热带地区建筑用产品的质量，第8章论述自动化和数据。第9章将该路径应用于RC-1，第10章阐述风险和决策标准。第11章列出证据缺口。附录（方法和假设、术语表、来源清单和数据表）及完整正文以英文和法文发布；本中文摘要版逐章摘要第1至第11章。

利益声明。本文由正在克里比筹建钢铁厂的Cameroon Steel发布，旨在为公共讨论提供参考；其分析独立于任何商业要约，所有数据均注明来源或标明其状态。

第1章

钢铁如何生产：两种炼铁方式，两种炼钢方式

每座钢厂首先要回答的问题是：含铁原料从何而来。铁可以通过高炉或直接还原厂从矿石中获取，也可以从废钢中回收；钢则通过向铁水吹氧或在电炉中熔化固态铁来生产。钢包、连铸和轧制等下游环节在各路线中基本相同。

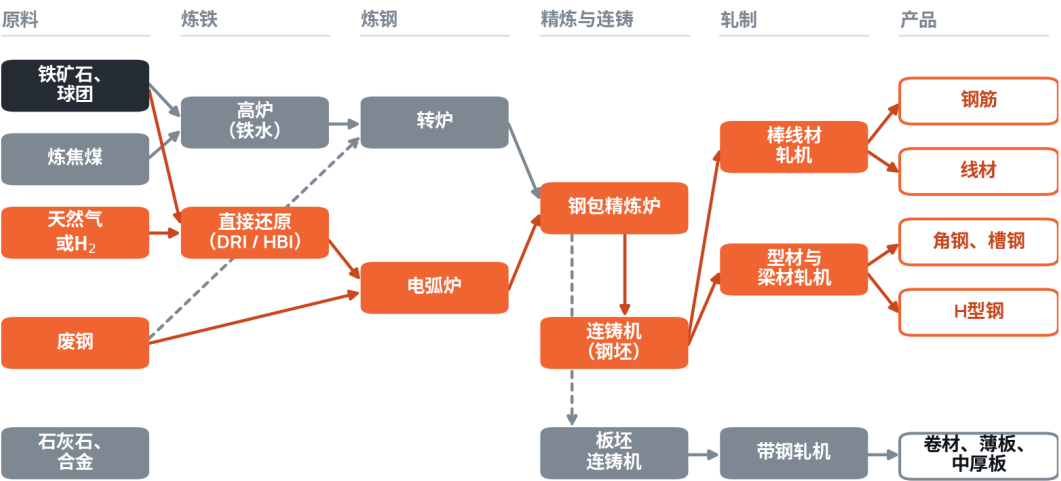
2025年全球粗钢产量18.494亿吨，其中约69.4%来自转炉路线，30.3%来自电炉[S40, S41]；非洲产量2980万吨，89.0%来自电弧炉[S41]。同年全球直接还原铁产量1.51亿吨，三分之二以天然气生产[S04]。高炉需炼焦煤和数百万吨级规模；竖炉以富氢还原气在固态下去除矿石中的氧，但无法去除脉石，因此要求更高品位的原料。电弧炉耗电约347至500千瓦时/吨钢水（国际金融公司基准）[S44]，可在数小时内启停，是废钢和DRI的天然搭档。

能源在各环节以不同形式进入：天然气基直接还原每吨DRI消耗约9.2至10吉焦天然气[S20, S48]，轧前加热每吨0.6至1.9吉焦[S49]，因此选择路线也就是选择能源供应方式。钢坯从连铸机热送轧机、热态DRI直接装入电弧炉，都可节约大量本需重新加热的能源[S50]。

本章结论是：决定性变量是含铁原料的来源，而不是炼钢炉本身。连铸和轧制可先行建设并长期沿用；电炉车间年产数十万吨即具经济性，而高炉只有在年产数百万吨时才有意义。

从矿石到钢材：六个环节，两种炼铁方式，两种炼钢方式

橙色路径为Cameroon Steel规划的电炉路线；灰色为其他路线



示意性工艺图。扁平材（卷材、薄板、中厚板）需要板坯连铸机和带钢轧机，不在规划范围之内。

示意 图1.1 钢铁价值链：两种炼铁路线（高炉、直接还原）和两种炼钢路线（转炉、电弧炉）汇入相同的精炼、连铸和轧制环节。橙色路径为Cameroon Steel规划的电炉路线。
资料来源：Cameroon Steel；工艺环节依据IEA《钢铁技术路线图》[S02]及欧盟钢铁生产参考文件[S42]。

第2章

路线比较：电炉在碳排放、规模和速度上胜出

五种炼钢方式中，适合中部非洲新生产商的有两种：以废钢和外购铁为原料的电弧炉，以及以天然气基直接还原铁为原料的电弧炉。按世界钢铁协会2024年路线平均值，二者每吨粗钢分别排放0.69吨和1.47吨CO₂，而高炉-转炉为2.34吨[S01]。

按国际能源署（IEA）口径推算的2019年美元基准（未作价格调整），各路线指示性资本支出处于同一量级：高炉约每吨产能500至900美元，天然气DRI-电弧炉510至1310美元，废钢电弧炉330至560美元[S02]；近年公布的项目预算更高。真正的差别在于不可分割的投资规模：高炉需年产数百万吨，而电炉车间年产30万至45万吨即可高效运行[S08, S57, S58]，直接还原模块可从年产25万吨起步[S04]。喀麦隆以水电为主的电网（约226克CO₂/千瓦时[S07]）进一步扩大电炉优势。欧盟碳边境调节机制（CBAM）已于2026年1月1日进入正式阶段，2026年第三季度证书价格为每吨CO₂e 82.32欧元[S53, S54]；按世界钢铁协会路线平均值计算的费用只是上限，因为这些平均值包含CBAM不对钢铁计价的外购电力和上游投入（见白皮书06表5.2）。感应炉难以满足磷含量要求[S10]，熔融还原尚不成熟[S11, S12]。

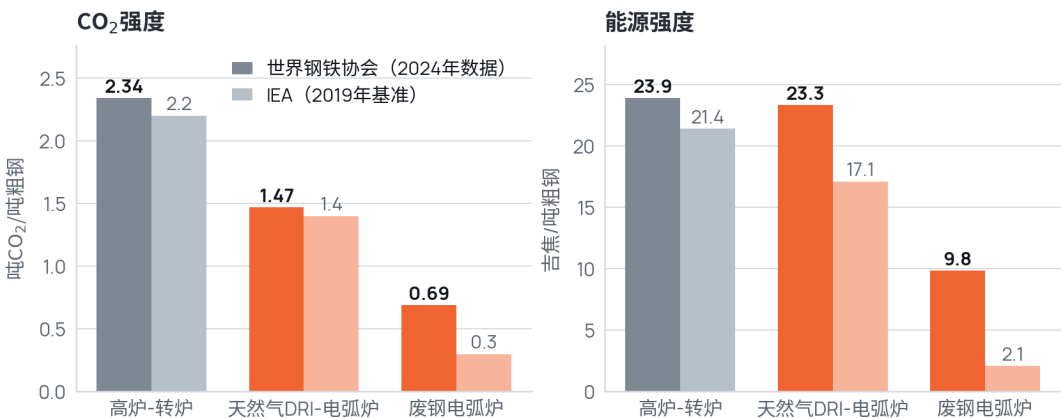
非洲自身的经验指向同一方向：北非以天然气基直接还原和电炉车间建立钢铁工业，阿尔及利亚由2021年约100万吨钢材净进口转为2025年约100万吨净出口[S63, S65]；而按Midrex工厂统计，撒哈拉以南非洲2025年DRI产量仅9万吨，两座竖炉直接还原厂（尼日利亚瓦里和南非萨达尼亚）处于停产状态[S04]；世界钢铁协会估计东非（乌干达、肯尼亚、坦桑尼亚）DRI产量约270万吨[S41]。

炼钢车间还须通过成本检验：按RC-1金属收得率0.88计，每吨钢坯约需1.15吨含铁原料[S03]，进口到岸钢坯价格与这部分炉料成本之间的差额，必须足以支付每吨450至490千瓦时的电耗、电极、耐火材料、合金、人工和维护；白皮书04第8章给出了克里比钢坯与进口到岸钢坯的指示性成本区间。

结论是：分期电炉路线在资本、灵活性、排放和速度四项标准之间取得最佳平衡。

废钢电弧炉吨钢CO₂约为高炉的30%；天然气DRI-电弧炉约为63%

深色柱：世界钢铁协会2024年路线平均值（范围一、二及上游；电力按一次能源计）。浅色柱：IEA直接+间接CO₂及终端能源。



来源 图2.2 两种公开口径下各路线的CO₂强度和能源强度。
资料来源：世界钢铁协会，Sustainability Indicators 2025，2024年数据[S01]；IEA《钢铁技术路线图》，2019年基准[S02]。

第3章

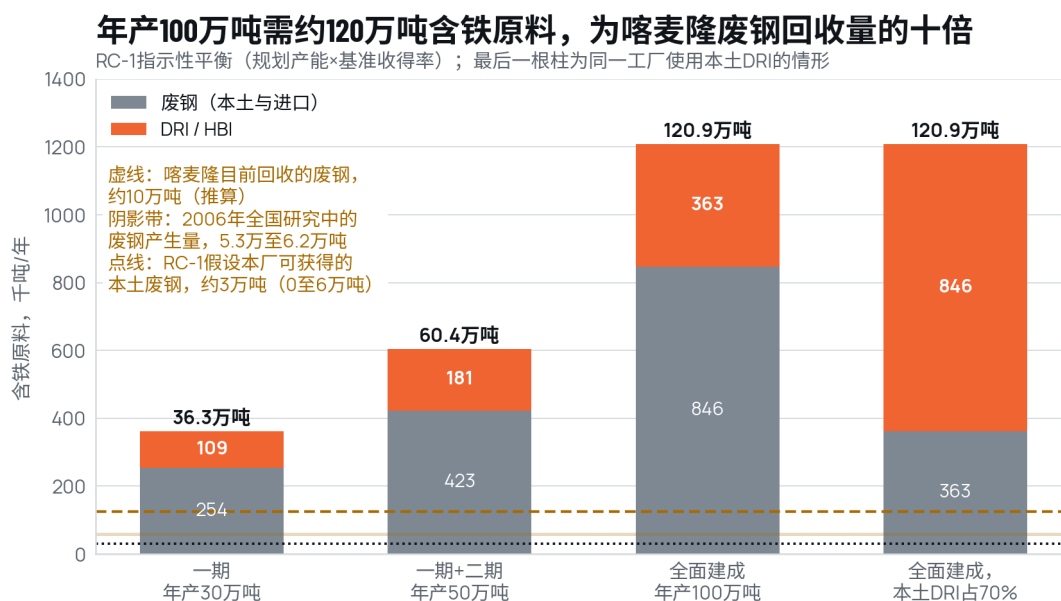
含铁原料：喀麦隆缺的是铁，而不是轧制能力

喀麦隆钢铁业的轧制能力已超过国内消费，所缺的是供给轧机的铁。钢坯已成为最大的单项钢材进口商品，2023年进口16.14万吨，价值1.517亿美元，是2019年的三倍，其中78%来自印度尼西亚[S05]；本土废钢仅能满足现有钢厂约40%的需求[S32, S33]。

按RC-1规划，年产30万吨、50万吨和100万吨的产能分别需要约36.3万吨、60.4万吨和120.9万吨含铁原料（推算）[S03]。喀麦隆唯一的全国研究估计废钢年产生量为5.3万至6.18万吨[S13]，目前回收量约在10万吨量级，且已被现有钢厂消耗（推算）。因此，RC-1假设本厂每年只能采购约3万吨本土废钢（区间0至6万吨）[S03]，一期须以进口废钢和进口DRI或HBI为主：按30%的DRI比例，每年约需10.9万吨DRI或HBI和25.4万吨废钢，其中约22.4万吨废钢需进口，港口进口量约35.1万吨（推算）[S03]。任何需要每年6万吨以上本土废钢的方案，按现有证据均不可行。每种原料至少两家供应商、有盖仓储、进场检验和正规废钢回收体系是基本做法。

国际市场可以满足一期需求：2025年DRI国际贸易量约1080万吨，HBI产量1160万吨，占全球DRI产量的7.7%[S04]；废钢主要出口地为欧盟和美国[S64]。但长期依赖外购将使工厂的大部分成本暴露于进口价格、运费和汇率风险之下。

长期答案是在克里比用喀麦隆矿石生产DRI：全面建成且本土DRI占炉料70%时，每年约需84.6万吨DRI。



推算 图3.2 RC-1各期所需含铁原料与本土废钢的比较；最后一根柱为全面建成且本土DRI占炉料70%的情形。
资料来源：Cameroon Steel参考配置RC-1（规划估算），指示性平衡[S03]；废钢研究[S13]；产量和废钢比例数据[S32, S74]；推算方法见全文附录A。

第4章

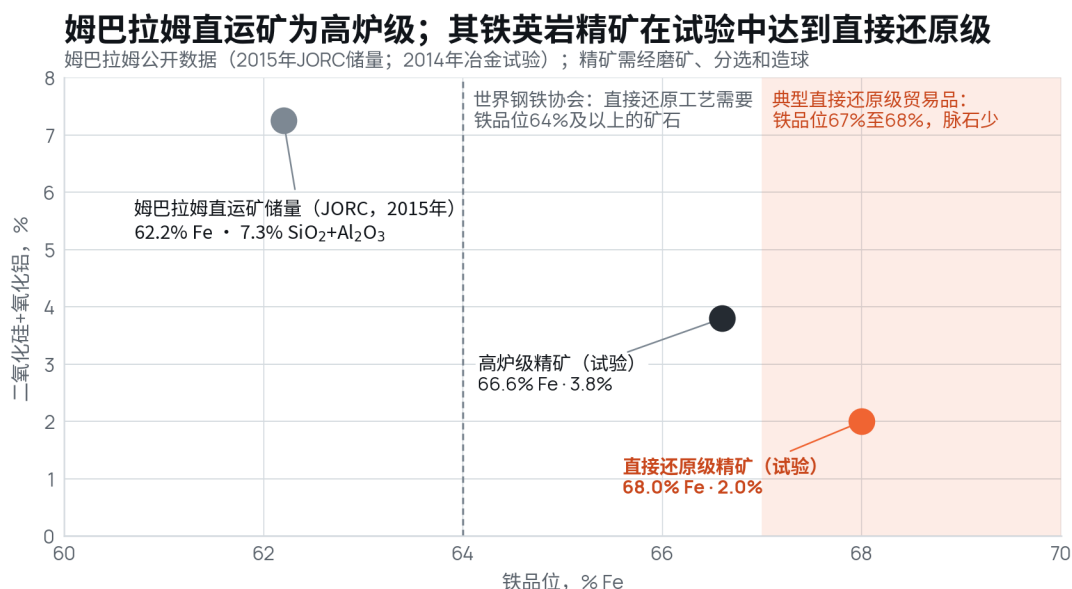
直接还原与矿石质量：喀麦隆的铁需先建选矿厂和球团厂

直接还原可以在克里比将喀麦隆矿石转化为洁净的铁，但前提是矿石先提质至直接还原级。世界钢铁协会指出直接还原需要铁品位不低于64%的矿石[S16]，贸易中的直接还原级球团通常为67%至68%[S17]。姆巴拉姆2015年JORC可能储量为5.17亿吨，铁品位62.2%，属高炉级[S18]；2014年对铁英岩的冶金试验得到品位68%、二氧化硅加氧化铝仅2.0%的直接还原级精矿，质量收得率45%，铁回收率81%[S19]。两者之间还缺一座选矿厂和一座球团厂。

年产100万吨DRI约需145万吨球团和约320万吨铁英岩（推算）。天然气是第二个前提：按每吨DRI约10吉焦计，100万吨模块每年需约91亿立方英尺天然气，约为喀麦隆2025年天然气产量（755亿立方英尺）的12%（推算）[S20, S21]；在产气田的剩余储量尚未公开[S35]。氢能就绪竖炉可逐步掺氢[S22]，但完全使用氢气需约27亿千瓦时电力，约为2025年全国发电量的三分之一[S51]。

直接还原级原料日益紧缺：据彭博新能源财经预测，到2030年海运直接还原级球团每年将短缺1500万吨，2040年扩大至1.33亿吨[S17]。非洲现有直接还原厂的经验也提示，供应链、天然气合同和下游炼钢车间须先行落实，否则工厂将被迫停产[S04]。

结论是：本土DRI是有明确前提条件的后续步骤，而非起点。



来源 图4.2 姆巴拉姆产品与直接还原级门槛的比较：铁品位与二氧化硅加氧化铝含量。
资料来源：JORC储量声明，2015年[S18]；冶金试验，2014年[S19]；世界钢铁协会门槛[S16]；典型直接还原级贸易品[S17]。

第5章

电弧炉炼钢车间：电力系统一并设计，一座40吨级电弧炉可支撑一期的大部分产量

一座40吨级电弧炉，加上钢包精炼炉和一台钢坯连铸机，可支撑一期的大部分产量，但达到每年30万吨名义产能需要很高的可用率或更大的变压器。按RC-1规划值每吨钢水450千瓦时计，每炉约40吨，约需18兆瓦时，按约25兆瓦有功功率通电约43分钟，冶炼周期约55分钟；按上限规划值约490千瓦时（炉料中DRI或HBI占30%）计，冶炼周期约59分钟。名义产能所需的约8000炉将占用全年8760小时中的约7300至7900小时；按年运行7000至7700小时，可生产约27万至30万吨成品，与RC-1预计持续产量一致；否则需约36至40兆伏安的变压器（均为推算）[S03]。

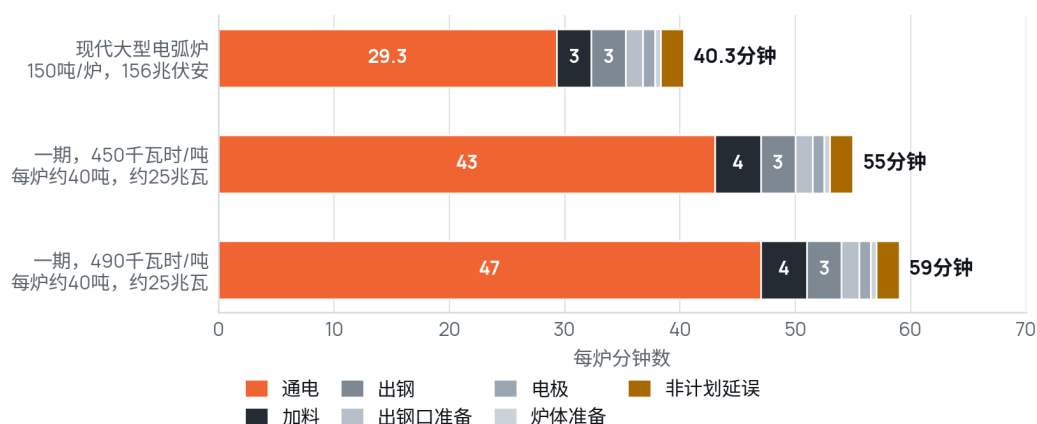
炼钢车间最难的设计问题不是冶金问题，而是电气问题。电弧炉负荷大且波动快，会造成电压闪变和谐波；塞尔维亚Metalfer和美国夏洛特的钢筋厂都曾被迫加装STATCOM：前者实测闪变降低系数超过5，后者的设计指标同样高于5[S23, S24]。喀麦隆电网在2026年10月仍有150兆瓦工业需求未获满足[S89]；克里比自治港（PAK）正在建设的225千伏线路初期可供100兆瓦，后期330至400兆瓦[S25, S34]，一期约55兆伏安的最大需求在初期容量之内。DRI比例每增加10个百分点，电耗约增加14.5千瓦时/吨[S20]。

电价结构同样影响电弧炉的运行方式：喀麦隆10兆瓦以上用户没有公开的管制电价，六家高压用户通过双边合同供电[S51]，因此容量电费和分时电价等条款应在关口1之前与接入协议一并商定。电弧炉可提供可调度负荷，即在一天之内把通电时段移出电网晚高峰，但不能提供持续的可中断负荷：一期产量已占用全年大部分时间，每中断一小时约损失一炉、即约40吨钢水，且无法补回（详见白皮书05）。

结论是：电弧炉、补偿装置和225千伏接入必须从一开始就作为一个系统来规定。

40吨级电弧炉每炉需55至59分钟，达到名义产能每年需约7300至7900小时

名义产能需约8000炉；年运行7000至7700小时可产成品约27万至30万吨；
上方为已发表的150吨设计



推算

图5.2 冶炼周期构成：一期指示性电弧炉（每吨450和490千瓦时）与已公开的现代大型电弧炉设计比较。

资料来源：一期数据根据Cameroon Steel参考配置RC-1（规划估算）[S03]和国际金融公司能耗基准[S44]推算；对标设计见La Metallurgia Italiana，2026年6月[S75]。

第6章

长材轧制：热坯直送和感应加热使一期全电化

轧机决定Cameroon Steel销售什么产品，也决定炼钢车间以外的大部分能耗。一期规划一条棒线材轧机，生产8至32毫米钢筋和5.5至12毫米线材，钢坯从连铸机热送并以感应加热补温[S03]；二期增加生产角钢、槽钢和扁钢的轻中型材轧机，三期增加H型钢重型材轧机，二者均采用燃气加热炉[S03]。

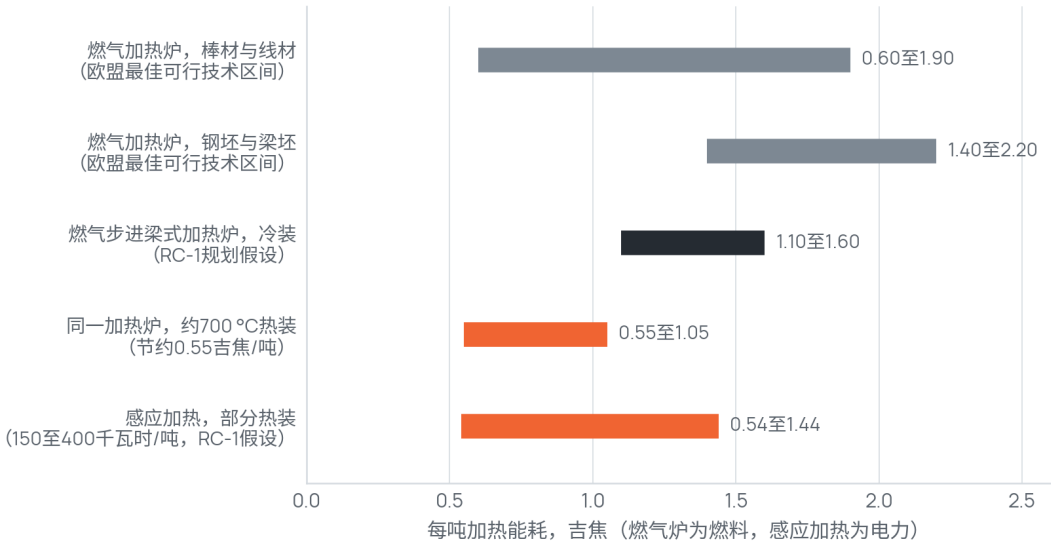
欧盟最佳可行技术对应的棒线材加热能耗为每吨0.6至1.9吉焦，而轧制本身仅0.1至0.5吉焦[S49]。700 °C热装每吨可节约约0.55吉焦[S50]，意大利一家轧机改为热装后燃料消耗下降40%[S95]。按喀麦隆2024年电网强度，每吨300千瓦时感应加热排放约0.068吨CO₂，与每吨1.3吉焦天然气（约0.073吨）相当[S07, S96]。因此一期选择感应加热的理由主要是简单：无需天然气接入、启停迅速、氧化烧损少。RC-1中一期天然气用量为零，二期起约26万吉焦/年[S03]。在线淬火自回火（TEMPCORE类）工艺可用普通碳锰钢生产500兆帕级可焊钢筋[S28]。

收得率和质量同样在轧机中形成：RC-1假设连铸和轧制综合收得率为每吨钢水产出0.94吨成品，每吨产品约产生20千克氧化铁皮并回收利用[S03]；激光测径、淬火水量和温度记录使每一根钢筋都可追溯到其炉次。

结论是：一期的公用工程风险集中在225千伏接入上，而不是天然气。

热装和感应加热降低连铸与轧制之间的能耗

按喀麦隆2024年电网（226克/千瓦时），每吨300千瓦时感应加热排放约0.07吨CO₂，与每吨1.3吉焦天然气相当



推算 图6.2 轧前加热能耗：燃气加热区间、热装与感应加热。
资料来源：欧盟黑色金属加工最佳可行技术结论[S49]；RC-1规划假设[S03]；热装节能[S50]；CO₂比较依据IPCC天然气默认排放因子[S96]和喀麦隆2024年电网排放因子[S07]。

第7章

热带建筑的钢筋质量：延性和认证比强度更重要

中部非洲的钢筋须同时满足两套规则：喀麦隆强制性国家钢筋标准NC 236/2024/06（依据2022年4月20日的部令强制执行，不包括Fe450牌号）[S26, S27]，以及承包商和贷款机构指定的国际牌号，主要是BS 4449 B500B或B500C和ASTM A615 Grade 60[S29, S30]。喀麦隆标准与质量局（ANOR）曾于2024年10月撤销一家生产商Fe450钢筋的合格证并下令召回[S26, S27]；总理府于2026年1月拒绝修改该标准，而部分建材（包括钢筋）质量不佳已被认为与建筑倒塌有关[S26, S27]。

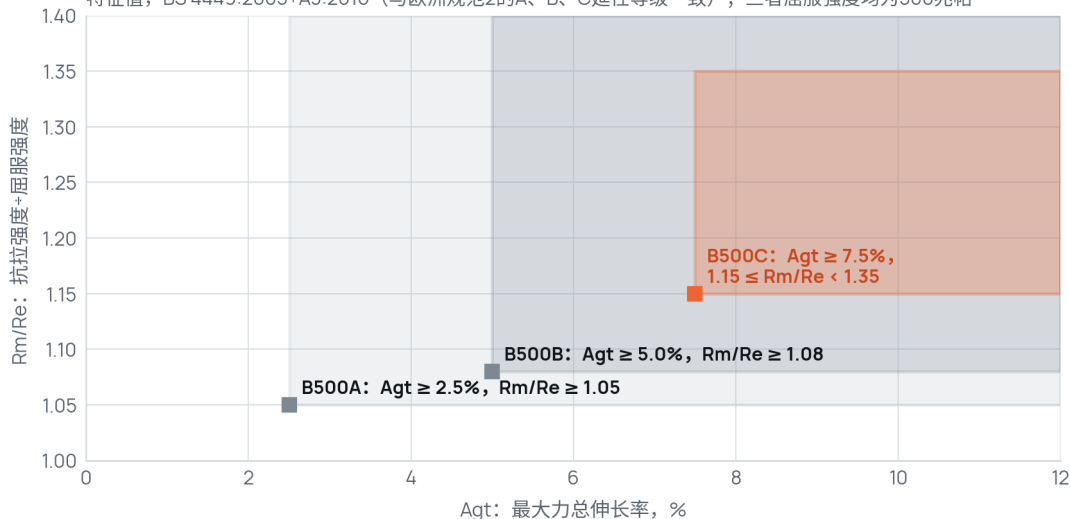
延性比强度更具决定性：BS 4449的三个等级屈服强度均为500兆帕，但最大力总伸长率Agt分别不低于2.5%、5.0%和7.5%，C级还将Rm/Re限定在1.15至1.35之间[S29]。电弧炉配钢包精炼炉可控制磷硫；在线淬火自回火使钢筋外层强、芯部韧[S28]。克里比年降雨约2836毫米，日最大相对湿度92%至96%[S99]，ISO 9223腐蚀等级尚未实测[S100]；耐久性首先取决于混凝土保护层，钢筋须有盖堆放、离地存放。

印度国家冶金实验室发现，大多数以DRI为原料的感应炉钢含磷0.08%至0.11%，高于印度标准和ASTM标准允许的0.03%至0.06%[S10]，这进一步说明了电弧炉造渣和钢包精炼的重要性。

结论是：质量进一步支持带钢包精炼炉的电炉路线，一期轧机须从第一天起配备在线淬火、尺寸在线测量和逐批检验实验室。

延性等级决定钢筋断裂前的伸长与强化程度

特征值，BS 4449:2005+A3:2016（与欧洲规范2的A、B、C延性等级一致）；三者屈服强度均为500兆帕



来源 图7.1 BS 4449的三个延性等级，与欧洲规范2的A、B、C等级一致。

资料来源：The Concrete Centre, Standards for reinforcement, BS 4449:2005+A3:2016摘要[S29]。

第8章

数字化与自动化：控制系统是工艺而非附加项

现代炼钢车间和轧机若没有自动化，就无法达到设计收得率、能耗和质量，而新建工厂的优势在于可以从一开始就将其纳入设计。基础自动化（L1）和过程模型（L2）逐秒控制电弧炉、钢包、连铸机和轧机；制造执行系统（L3）将每捆钢筋追溯到其炉次；能源管理系统将计量转化为节约。通过ISO 50001认证的制造工厂第一年能效提高约4.1%，十二年后每年仍提高约3.4%[S31]。按一期规划年用电约2.89亿千瓦时（电耗取上限值时约3.02亿千瓦时）计，4%的改进每年约节约1200万千瓦时（推算）[S03]。

追溯链从装料批次、炉号、钢坯编号、轧制批次、钢筋捆标签直至EN 10204 3.1型质量证明书。在标准机构曾撤销合格证并下令召回不合格钢筋的喀麦隆市场[S26, S27]，追溯保护诚信生产商；欧盟碳边境调节机制（CBAM）也要求进口商申报钢铁产品的隐含排放[S53]，因此须从第一炉起按炉次和产品计量CO₂。控制网络与管理网络应按ISA-95分层隔离，并采用IEC 62443安全标准。

人才是系统发挥作用的关键：工厂需要同时掌握冶金和模型的工艺工程师，而雅温得国立高等理工学院（ENSPY）有专门的冶金系[S39]，因此供应商培训、模拟器培训和与院校的合作应纳入技术合同。

结论是：L1和L2功能及其性能测试、全厂统一标识体系、满足ISO 50001和产品碳足迹的计量，以及安全的自动化架构，都应在一期开始时写入合同。

工厂控制的五个层级，各有其时间尺度

ISA-95 / IEC 62264功能层级在炼钢车间和轧机中的对应



定义：OPC基金会ISA-95通用对象模型。钢铁示例仅为示意。

示意 图8.1 ISA-95功能层级在炼钢车间和轧机中的对应。
资料来源：Cameroon Steel；层级定义依据OPC基金会ISA-95通用对象模型[S101]。

第9章

分期路径的应用：RC-1分四步达到年产100万吨

Cameroon Steel正在克里比港综合工业区的姆博罗筹建钢铁综合体，2024年12月30日由总理代表国家元首奠基[S77, S104]；据《喀麦隆论坛报》2025年1月报道，设计产能为年产100万吨，分期实现[S105]。RC-1（本文引用为Cameroon Steel参考配置RC-1，规划估算）是将这一公开描述转化为装置、产能和公用工程的5级规划配置[S03]。

一期（规划）名义产能每年约30万吨（钢水约32万吨），预计持续产量27万至30万吨；目标于2029年第一季度在取得环境证书后开工，2030年下半年首炉出钢，2031年爬坡；二期（第二条熔炼线及轻中型型材轧机，约20万吨型材）暂定2032至2034年；三期（炼钢扩能及重型型材轧机）2034年后，产能达约100万吨；直接还原模块更晚，视矿石、天然气和审批情况而定[S03]。一期平均负荷约36至38兆瓦、最大需量约55兆伏安，在园区225千伏线路初期100兆瓦以内；全面建成平均约94至99兆瓦、最大需量约160兆伏安，需线路后期330至400兆瓦[S25, S34]。一期不用天然气。在30%进口DRI条件下，范围一和范围二排放约为每吨成品0.32至0.34吨CO₂，计入进口DRI上游排放约0.58至0.59吨，低于世界钢铁协会废钢电弧炉0.69吨和DRI-电弧炉1.47吨的平均值[S01, S03]。

一期炼钢车间生产钢坯，产品可在轧材与商品钢坯之间灵活分配：国内钢筋产能约62.7万吨，是约18万吨需求的三倍以上[S06]；现有再轧厂2023年进口钢坯16.14万吨[S05]。因此，一期产量用于替代进口钢坯和线材并出口CEMAC市场，而非增加钢筋（白皮书04）。

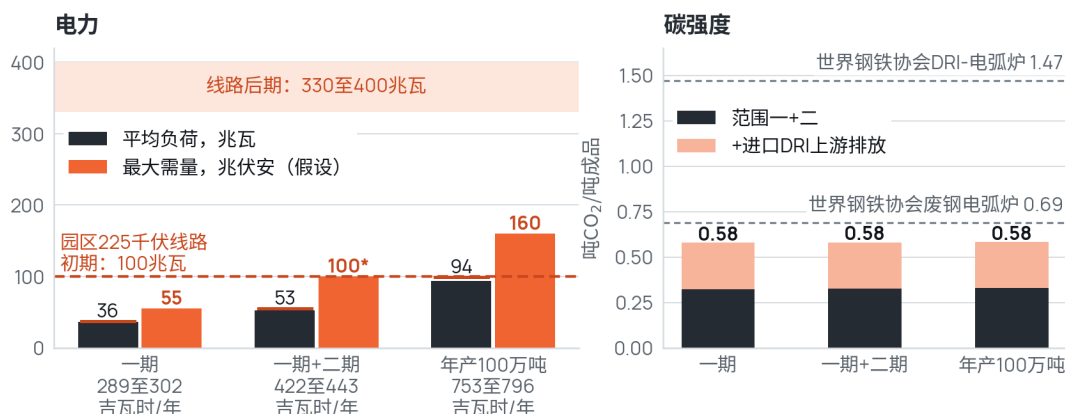
时间顺序同样重要：前端工程设计、环境与社会影响评估（2028年第三季度听证、第四季度取得证书）和融资均为目标日期；其后各步均为指示性日期[S03]。从开工到首炉出钢约18至24个月，须在融资关闭时订购长周期设备；国际金融公司对最高风险类别项目须在董事会审批前60天披露环境与社会审查[S106]；二期投资决策不太可能早于2032年。一期的任何环节都不取决于姆巴拉姆矿山或新气田的开发进度。

结论是：RC-1是一座按模块成长的工厂，每一步都可依据自身结果融资和论证。

一期在园区初期100兆瓦以内；年产100万吨需线路后期330至400兆瓦

RC-1指示性平衡（450千瓦时/吨）；红色短线及较高吉瓦时数为490千瓦时/吨情形。

*一期+二期最大需量为插值（推算，85至110）。强度不含本土DRI模块。



推算 图9.2 RC-1各期电力需求和碳强度，对照园区225千伏线路各阶段和世界钢铁协会路线平均值。

资料来源：Cameroon Steel参考配置RC-1（规划估算），指示性平衡（450千瓦时/吨），括号或较高值为490千瓦时/吨情形[S03]；园区225千伏线路和变电站各阶段[S25, S34]；世界钢铁协会路线平均值[S01]。

第10章

技术风险与决策标准：在投入前化解重大风险

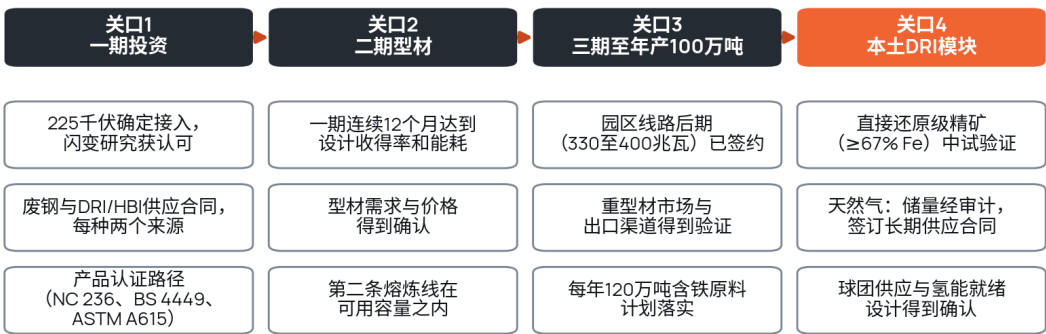
分期电炉路线的风险低于其他方案，但并非没有风险。技术风险集中在少数接口：工厂接入一个仍有150兆瓦工业需求未获满足的电网[S89]；直接还原级原料趋紧的含铁原料市场[S17]；仅在试验中达到直接还原级的喀麦隆矿石[S19]；直接还原模块所需的天然气；以及一座达到名义产能每年须运行约7300至7900小时的单一电弧炉。每项风险都可在资金投入之前通过研究、中试和合同加以降低。

本章提出四道以证据而非日期为准的关口，每道关口可得出“通过”“暂缓”或“重新设计”的结论。关口1（一期投资）要求确定的225千伏接入和获认可的闪变研究、每种含铁原料两个来源且价格相对进口到岸钢坯留有正差额、产品认证路径、获批并在贷款方董事会审批前按期公开披露的环境与社会影响评估[S106]，以及供应商对吨钢电耗、电弧炉可用率和产能的性能保证（变压器规格须能实现27万至30万吨的预计持续产量）；关口2要求一期连续十二个月达到设计水平；关口3要求线路后期供电签约并落实每年120万吨含铁原料；关口4要求铁品位不低于67%的精矿中试验证、球团供应、经审计的天然气储量和长期合同，以及氢能就绪设计。与之相比，再轧厂、高炉、感应炉或先建直接还原厂的风险都更大。

结论是：大部分技术风险可以在投入前化解，四道关口把这一原则变成了决策规则。

四道关口，均凭证据而非日期开启

分期路径的指示性关口顺序；每道关口可得出“通过”“暂缓”或“重新设计”的结论



关口标准示意决策者应要求的证据，并非承诺。

示意 图10.1 分期电炉路线的指示性决策关口及各关口所需证据。
资料来源：Cameroon Steel。

第11章

证据缺口：尚不了解的情况及其解决方式

本文依据公开资料和Cameroon Steel的规划基础编写。若干对技术选择有重要影响的事实尚不清楚，或仅有陈旧、局部或模型化的数据。这些缺口都不改变分期电炉路线的结论，但会影响各步骤的规模、时间或设计，并与第10章的决策关口一一对应。

关口1之前需解决的缺口包括：225千伏接入点的短路容量和确定容量；供应商保证的吨钢电耗（规划区间每吨450至490千瓦时）、炉时、收得率和产能，以及变压器规格，它们决定一座电弧炉能否达到名义产能；贷款方要求的影响评估披露期限[S106]；当前本土废钢产生量和回收情况（唯一研究的数据来自2006年[S13]）；RC-1仅假设本厂每年可获得约3万吨本土废钢[S03]；进口HBI和废钢的长期价格与条款（与进口钢坯价格一起决定炼钢车间的成本差额，见白皮书04第8章）；NC 236全文及其检验要求；电弧炉粉尘的处置途径。关口2之前需在克里比开展为期一年的ISO 9223大气腐蚀性实测[S100]；关口2和3之前需完成型材市场研究。关口4之前需解决：直接还原级精矿的中试验证、球团厂的地点、所有者和时间安排、剩余天然气储量和长期气价[S35]。此后还需落实用于掺氢的低碳电力。

Cameroon Steel计划在RC-1目标的2027至2028年前端工程设计和影响评估期间（2028年第四季度取得证书）填补关口1的缺口，并在结果可得时更新本文。实测数据一经获得即取代基准值；推算值始终与其输入一并列出；无法溯源的数据一律不予发布。

附录A

术语表

下表列出本白皮书主要术语的英文、法文和中文对照，术语依据本系列统一术语表。完整定义见全文版附录B。单位采用国际单位制；“吨”指公吨。本中文版为摘要版；包括方法与假设（附录A）、术语表（附录B）、来源清单（附录C）和数据表（附录D）在内的完整正文以英文和法文发布，如有差异，以英文原版为准。

工艺与装备

表A.1 工艺与装备术语

English	Français	中文
Electric arc furnace (EAF)	Four à arc électrique (FAE)	电弧炉
Scrap-based EAF	FAE à ferraille	废钢电弧炉
Ladle furnace (LF)	Four-poche	钢包精炼炉
Blast furnace-basic oxygen furnace (BF-BOF)	Haut fourneau-convertisseur (HF-BOF)	高炉-转炉
Direct reduction (DR)	Réduction directe	直接还原
Direct-reduced iron (DRI)	Fer de réduction directe (DRI)	直接还原铁（DRI）
Hot-briquetted iron (HBI)	Fer briqueté à chaud (HBI)	热压块铁（HBI）
Shaft furnace	Four à cuve	竖炉
Pellet / pellet plant	Boulette / usine de bouletage	球团 / 球团厂
Concentrator / concentrate	Usine de concentration / concentré	选矿厂 / 精矿
Continuous casting	Coulée continue	连铸
Rolling mill	Laminoir	轧机
Tap-to-tap time	Temps de coulée à coulée	冶炼周期
Quench and self-temper (QST, TEMPCORE)	Trempe et autorevenu	淬火自回火
Induction heating / hot charging	Chauffage par induction / enfournement à chaud	感应加热 / 热装
Schedulable load / interruptible load	Charge programmable / charge interruptible	可调度负荷 / 可中断负荷
Flicker / STATCOM	Papillotement (flicker) / STATCOM	电压闪变 / 静止同步补偿器 (STATCOM)

原料与产品

表A.2 原料与产品术语

English	Français	中文
Iron units, metallics	Unités de fer	含铁原料
Steel scrap	Ferraille	废钢
Pig iron / hot metal	Fonte brute / fonte liquide	生铁 / 铁水
DR-grade ore	Minerai de qualité réduction directe	直接还原级矿石
Direct-shipping ore (DSO)	Minerai à expédition directe (DSO)	直运矿
Itabirite	Itabirite	铁英岩
Gangue	Gangue	脉石
Billet / merchant billet / re-roller	Billette / billette marchande / relamineur	钢坯 / 商品钢坯 / 再轧厂
Wire rod	Fil machine	线材
Rebar	Rond à béton (armatures)	钢筋
Sections / H-beams	Profilés / poutrelles H	型材 / H型钢
Slag	Laitier	钢渣

碳排放、机构与项目

表A.3 碳排放、机构与项目术语

English	Français	中文
CBAM	MACF (mécanisme d'ajustement carbone aux frontières)	碳边境调节机制 (CBAM)
Scope 1 / 2 / 3	Périmètre 1 / 2 / 3	范围一 / 二 / 三
Embedded emissions	Émissions intrinsèques	隐含排放
Grid emission factor	Facteur d'émission du réseau	电网排放因子
ESIA	EIES	环境与社会影响评估
Kribi industrial-port zone	Zone industrialo-portuaire de Kribi	克里比港综合工业区
Port Autonome de Kribi (PAK)	Port Autonome de Kribi (PAK)	克里比自治港 (PAK)
CEMAC	CEMAC	中部非洲经济与货币共同体
IFC	SFI	国际金融公司
Reference configuration RC-1 (planning estimate)	Configuration de référence RC-1 (estimation de planification)	参考配置RC-1（规划估算）
Phased pathway / decision gate	Trajectoire par phases / jalon de décision	分期路径 / 决策关口
Evidence gaps	Lacunes de connaissance	证据缺口

资料来源：Cameroon Steel；系列统一术语。

CAMEROON STEEL

从矿产资源到工业价值

Cameroon Steel正在克里比港综合工业区内的姆博罗（Mboro）筹建钢铁综合体，将废钢、进口铁以及未来的喀麦隆矿石转化为中部非洲建设所需的钢筋、线材和型材。本文仅供参考，不构成要约或承诺。