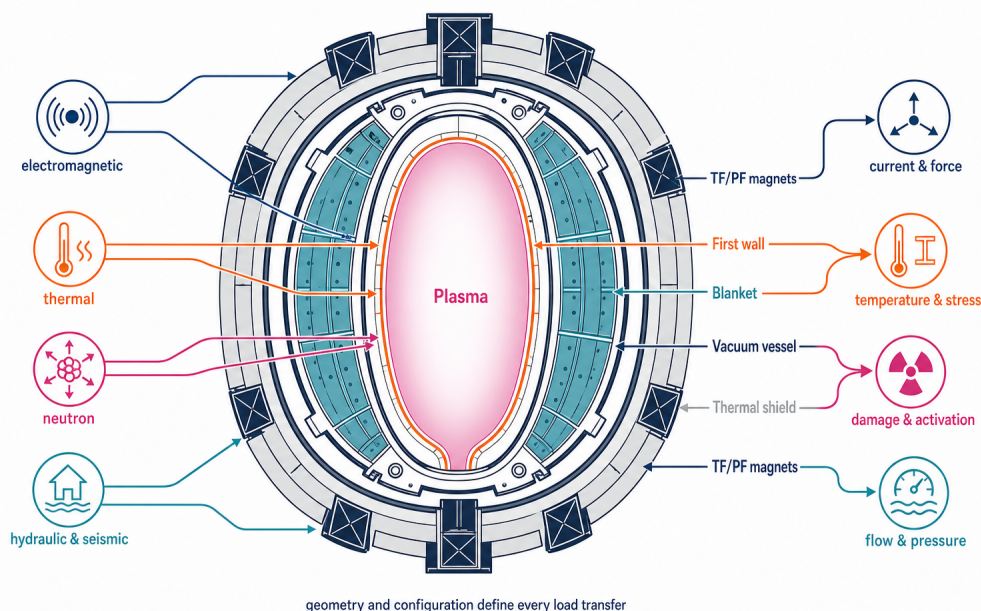




封面图 Tokamak 工程对象、载荷源与响应量。image-2 重绘，作者审校。

托卡马克工程仿真

从等离子体载荷到可验证工程数字线程

4.3 万字符

55 个工具组

87 条来源

15 张解释图

面向聚变数字孪生、系统工程、CAE、控制、实验和项目管理团队。报告重点回答工程仿真算什么、工具如何选择、物理载荷如何进入工程模型、实验如何确认，以及如何由 DINA/MEQ 控制服务逐步形成面向聚变堆和电厂的工程孪生。

阅读导航与目录

非工程背景读者建议先读执行摘要、第 1—3 章和第 17 章；各专业团队可直接进入对应章节。完整工具矩阵、验证/采购检查表和 87 条来源在附录中。

阅读导航与目录	2
执行摘要	5
1. 面向非工程仿真专业读者的基础科普	5
1.1 工程仿真在算什么	5
1.2 Tokamak 为什么比普通工业设备更难	6
1.3 装置、聚变堆和电厂的工程目标不同	6
2. 工程仿真的输入、输出和证据链	7
2.1 从物理模型接收的正式输入	7
2.2 工程与实验如何对接	7
2.3 可信度层级	8
3. 工具全景与分类方法	8
4. 几何、CAD、网格与配置管理	10
4.1 工程几何不是“画得像”	10
4.2 几何派生与数据契约	10
5. 电磁、破裂载荷与真空室/被动结构	11
5.1 物理—工程接口	11
5.2 Tokamak 专用电磁工具	12
5.3 通用电磁和结构平台	13
5.4 验证策略与装置案例	13
6. 超导磁体、结构、失超与低温	14
6.1 磁体工程的多层模型	14
6.2 专用失超与低温工具	14
6.3 通用平台与验证设施	15
7. 第一壁、偏滤器、热流体和材料寿命	16
7.1 从等离子体热流到部件寿命	16
7.2 HEAT 与聚变专用热负荷工具	17
7.3 CFD、传热和结构工具	17
7.4 高热流试验与模型关联	18
8. 中子学、核热、屏蔽、活化和停机剂量	19
8.1 工程问题和数据链	19
8.2 主要粒子输运代码	19
8.3 CAD 转换、核数据和活化工具	20
8.4 停机剂量 workflow 与验证	20

9. 包层、冷却回路、液态金属 MHD 与氦	21
9.1 包层的耦合网络	21
9.2 系统热工水力和 CFD	21
9.3 液态金属磁流体工具	22
9.4 氦输运、库存和燃料循环	22
10. 真空、低温、电源、加热和厂用系统	24
10.1 真空系统	24
10.2 低温与公用工程	24
10.3 电源、保护和电网	24
10.4 加热、电流驱动与诊断工程	24
11. 安全、事故、厂房与环境	25
11.1 安全分析不是普通 CFD 的放大版	25
11.2 厂房、屏障与防护	25
12. 远程维护、装配、制造与 RAMI	26
12.1 远程维护仿真	26
12.2 装配和制造仿真	26
12.3 RAMI、维修物流和可用率	26
13. 材料、结构准则和寿命证据	27
14. 物理、工程与实验的集成方法	28
14.1 三条数字线程	28
14.2 载荷转换服务	28
14.3 耦合强度如何选择	29
14.4 与实验协同的标准工作流	29
15. 主要装置和项目如何组合工具	31
15.1 ITER	31
15.2 SPARC	31
15.3 JT-60SA	31
15.4 EAST 与 CFETR	31
15.5 JET、MAST-U、DIII-D 与 DTT	31
15.6 KSTAR 与其他装置	31
16. 工具优缺点和推荐组合	32
16.1 商业主干 + 开放验证轨	32
16.2 纯开放路线的适用范围	32
16.3 不建议的选型方式	32
17. 从 DINA/MEQ 到 Tokamak 工程数字孪生的路线	33
阶段 E0: 工程数据与配置基础 (0-12 个月)	33

阶段 E1: 破裂电磁—结构窄孪生 (12-24 个月) 33

阶段 E2: PFC 热状态与磁体/低温健康 (2-3 年) 33

阶段 E3: 核环境、氦与部件寿命 (3-5 年) 33

阶段 E4: 维护、RAMI 与安全决策支持 (4-6 年) 34

阶段 E5: 聚变堆/电厂全生命周期 (5-8 年) 34

18. 组织、人才与近期行动清单 35

19. 结论 36

附录 A: Tokamak 工程仿真工具比较矩阵 37

 A.1 几何、数据与工作流 37

 A.2 破裂、电磁、结构与磁体 38

 A.3 热流体、PFC、包层和氦 39

 A.4 中子、安全、真空、维护与生命周期 40

附录 B: 验证与采购检查表 41

附录 C: 参考来源 42

执行摘要

Tokamak 工程仿真的任务不是“再做一套聚变物理模拟”，而是把等离子体、磁体和核反应给出的场景转化为部件能够承受、系统能够运行、人员能够维护、监管能够接受的工程证据。它关心的核心问题包括：真空室和支撑能否承受破裂电磁载荷；磁体在正常脉冲、快速放电和失超时是否保持绝缘与结构完整；第一壁和偏滤器能否在稳态热流、ELM、失控电子和循环载荷下达到寿命；屏蔽和包层能否控制核热、活化、剂量和氚增殖；冷却、真空、低温、电源、燃料循环与安全系统在故障下是否仍有足够裕量；维护方案是否能在辐射和狭窄空间内按计划完成。

工程仿真与物理模拟的分界并不等于“一个研究等离子体、一个研究金属”。真正的分界是输出责任：物理模型通常给出等离子体边界、时间历程、粒子与热通量、磁场、辐射和中子源；工程模型把这些源项映射到配置受控的三维资产，计算温度、位移、应力、应变、疲劳、流量、压降、剂量、活化、库存、失效概率和维修时间；实验与制造数据再用于校准材料、接触、湍流、传热、氚滞留、绝缘退化等难以从第一性原理可靠确定的参数。

本报告的首要判断有六点。

1. 没有单一软件可以承担 Tokamak 工程仿真。CATIA/ENOVIA、Ansys、Abaqus、COMSOL、MCNP、TRIPOLI-4、OpenMC、CFX、OpenFOAM、MELCOR、FESTIM、TMAP8、4C、HEAT、CARIDDI、ThinCurr 等分别解决不同的几何、物理、时间尺度和证据责任。集成的对象应是配置、载荷、接口和验证证据，而不是强迫所有方程进入一个求解器。
2. CAD/PLM 是工程仿真的资产身份底座。如果一个中子学模型、热流体模型和结构模型指向不同版本的端口、屏蔽块或冷却流道，再高精度的求解也无法形成可审计结论。ITER 以 CATIA/ENOVIA 和工程数据库组织大规模配置，并把机械设计、厂房设计与工程属性关联起来，说明工程数字线程首先是配置管理问题。[E1-E3]
3. 物理到工程的主要风险发生在载荷转换。破裂电流猝灭时间、VDE 轨迹、halo 电流分布、偏滤器热流宽度、中子源空间分布和材料温度依赖性，常比有限元求解器本身更主导结论。应把“载荷包”作为正式交付物，携带来源、单位、坐标系、插值方法、时间基准、适用域与不确定度。
4. 验证必须分层。代码制造解和解析解验证数值实现；跨代码基准检验方法差异；小样、回路、磁体模型线圈、高热流试验和材料试验校准局部现象；真实 Tokamak 放电、冷却、真空、剂量和维护数据验证系统级预测。仅与另一个软件结果一致不能代替实验确认。ASME V&V 10、V&V 20 和 NAFEMS 工程仿真质量方法可以作为组织骨架。[E4-E6]
5. 商业平台成熟，但聚变专用证据仍需自建。Ansys、Abaqus、COMSOL、Simcenter、STAR-CCM+ 在几何、网格、非线性、耦合、优化和工业支持方面优势明显；它们并不自动包含可靠的 disruption、halo current、CICC 失超、14 MeV 中子活化、氚陷阱或液态金属高 Hartmann 数模型。组织必须保留专用代码、用户子程序、材料数据库和验证算例的所有权。
6. 工程数字孪生应从“载荷—响应窄孪生”开始。当前 DINA/MEQ 控制服务最自然的下一步，不是直接模拟整厂，而是形成配置受控的等离子体—导体—结构载荷服务；随后接入 PFC 热状态、磁体/低温状态、核热/活化、氚与冷却回路，最后才形成覆盖寿命、维修、RAMI 和安全裕量的电厂级孪生。

1. 面向非工程仿真专业读者的基础科普

1.1 工程仿真在算什么

工程仿真通常把现实部件抽象为几何、材料、本构关系、初边值条件和失效准则。有限元法（FEM）常用于结构、热传导和低频电磁；有限体积法（FVM）常用于流体与共轭传热；蒙特卡洛粒子输运常用于中子、光子和活化源项；系统级一维网络模型用于管路、换热器、泵、阀门、低温与安全瞬态；多体动力学与机器人仿真用于装配和远程维护；可靠性框图、蒙特卡洛任务模拟和离散事件模型用于可用率与维护周期。

一个模型的“高保真”不是绝对概念。三维非线性接触有限元可能比梁模型更详细，但如果它使用了错误的温度场、约束或焊缝性能，预测反而更不可信。工程上更实用的概念是“对指定用途足够”：概念筛选可以使用简化解析模型；设计定型需要网格收敛、材料批次数据和载荷包；核安全或寿命决策还需要独立复核、试验关联和不确定度界限。

1.2 Tokamak 为什么比普通工业设备更难

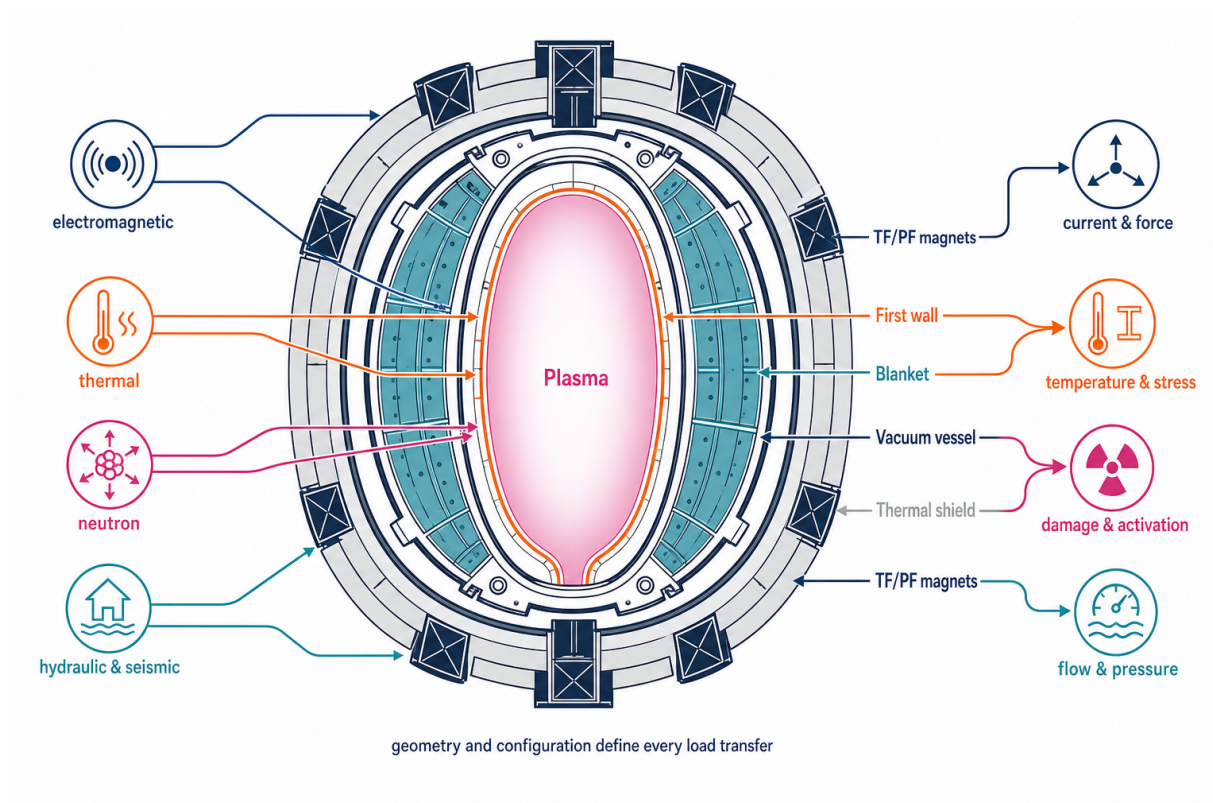


图 1 Tokamak 工程对象、载荷源与响应量的分层关系。image-2 重绘，作者审校。

Tokamak 同时叠加了强磁场、大电流、超高真空、低温超导、高温等离子体、强中子/伽马辐射、高热流密度、脉冲载荷和远程维护。其关键耦合包括：

- 等离子体电流变化在真空室、被动板、偏滤器和包层中产生涡流，涡流与背景磁场形成洛伦兹力；halo 电流还可直接穿过部件连接和支撑。
- 线圈电流产生磁场与巨大面内/面外力；变形反过来改变接触、绝缘应力和磁场误差；失超又将电磁储能转化为焦耳热和压力波。
- 等离子体平行热流通过磁力线映射到三维 PFC 表面，阴影、错位和边缘可能形成热点；冷却流动、材料界面、循环塑性和辐照性能共同决定寿命。
- 14.1 MeV 中子在复杂 CAD 几何中沉积核热、损伤材料、产生活化和氚；温度和密度又影响热工与氚迁移。
- 事故时真空丧失、冷却剂侵入、蒸汽—金属反应、氢同位素和放射性粉尘迁移必须在系统与厂房尺度上联合评估。

这些耦合跨越微秒到数十年、毫米到厂房、单个焊缝到整机。工程上不会追求一个统一网格和统一时间步，而会通过载荷映射、子模型、降阶模型和证据门把不同尺度连接起来。

1.3 装置、聚变堆和电厂的工程目标不同

实验 Tokamak 主要目标是安全完成放电、保护设备并获得可解释数据。它可以接受较低占空比、频繁改造和一定人工介入，因此工程仿真重点是脉冲载荷、保护、诊断可达性、局部热状态和改造兼容性。ITER 进一步要求核环境、超导磁体、氦、远程维护和核安全，但不以连续发电为目标。DEMO、STEP、ARC 类聚变堆/电厂则必须闭合氦、热功率转换、部件更换、可用率、废物、检修和经济性。

因此同一软件在不同装置中的用途也不同：MCNP 在实验装置可用于诊断屏蔽和剂量，在反应堆要承担核热、屏蔽、TBR、dpa、气体产生和维护剂量；ANSYS 在铜线圈装置可能重点评估脉冲热与疲劳，在超导装置还要结合预紧、接触、失超和低温材料；HEAT 在 DIII-D/SPARC 可用红外数据验证表面热流，在电厂阶段则还必须与材料退化、冷却失效和寿命模型连接。

2. 工程仿真的输入、输出和证据链

2.1 从物理模型接收的正式输入

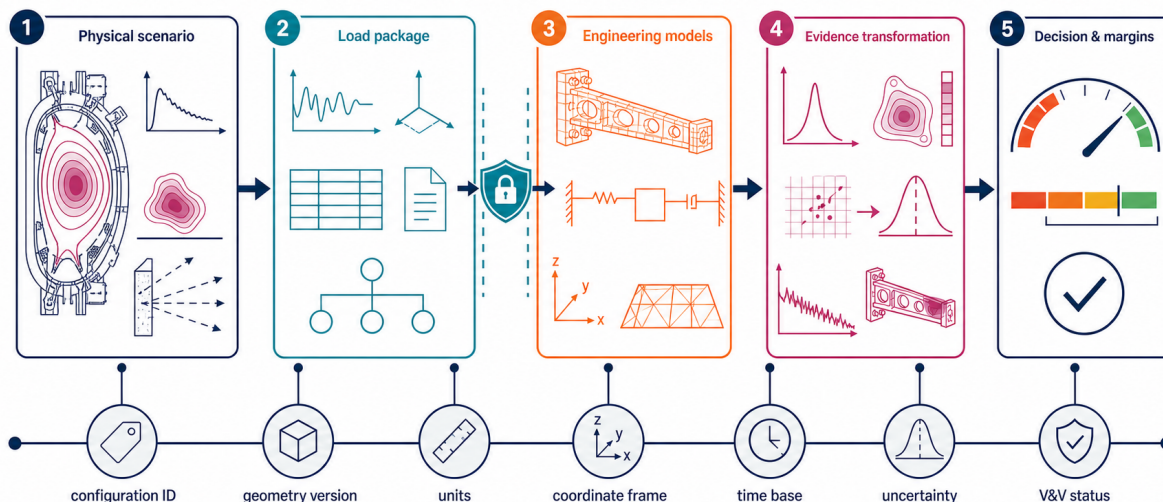


图 2 从物理场景、载荷包到工程决策的可审计数字线程。image-2 重绘，作者审校。

物理团队不应只发送图片或一组“最坏值”。面向工程的场景数据至少应包含：平衡和等离子体边界随时间的演化；等离子体总电流、内感、位置、形状和电流猝灭时间；线圈电流与母线电流；三维磁场与误差场；halo 电流总量、环向不对称和接触带假设；热流、辐射、粒子和失控电子源项；中子源强、能谱、空间和时间分布；脉冲序列、占空比与故障频率。

载荷包还要说明坐标系、网格、单位、参考 CAD 版本、插值/外推、平滑、守恒误差、场景概率和不确定度。工程模型随后输出温度、压强、流量、位移、应力、应变、接触压力、疲劳使用因子、断裂裕量、绝缘电压、热点温度、剂量、活化、核热、TBR、氦库存、故障后果和维修时间。

2.2 工程与实验如何对接

实验对接不是模型完成后的展示，而是建模计划的一部分。每个关键不确定性都应对应可测量量：

- 电磁与结构：Rogowski 线圈、磁探针、应变片、位移计、加速度计、支撑反力、快速相机和破裂数据库。
- 磁体与低温：电压抽头、光纤温度、压力、质量流量、失超检测、磁场测量和模型线圈测试。
- 热流体与 PFC：红外热像、嵌入式热电偶、量热、压降、流量、沸腾/临界热流、高热流电子束和等离子体暴露试验。
- 中子与活化：活化箔、裂变室、剂量计、光谱仪、停机剂量测量、FNG/OKTAVIAN 等积分基准和真实 D-T 装置数据。
- 氦与材料：热脱附谱、渗透、滞留、陷阱密度、离子束/中子辐照、小样热循环和破坏/无损检查。
- 真空与维护：压力计、残余气体分析、泵速试验、漏率、数字样机碰撞检查、力反馈、任务时间和全尺寸训练设施。

验证时应保留“计算—实验比较对象”的一致性：测量的不是节点温度，而是传感器体积与响应函数卷积后的读数；应变片包含粘结层和方向性；中子探测器存在能量响应；红外发射率会随表面状态变化。正确做法是生成合成传感器输出，再与原始数据比较。

2.3 可信度层级

本报告把工程模型证据划分为六级。G0 表示求解器能运行；G1 表示软件回归、单位和守恒检查通过；G2 表示网格/时间步/迭代误差和解析或制造解验证；G3 表示跨代码基准与部件级试验关联；G4 表示在目标装置和目标工况上通过盲预测或独立数据验证；G5 表示模型已纳入配置、权限、监测、失效回退与变更控制，可以持续支持高后果决策。多数工程论文处于 G2-G3；数字孪生运行服务至少要达到与其决策风险匹配的 G4-G5。

3. 工具全景与分类方法

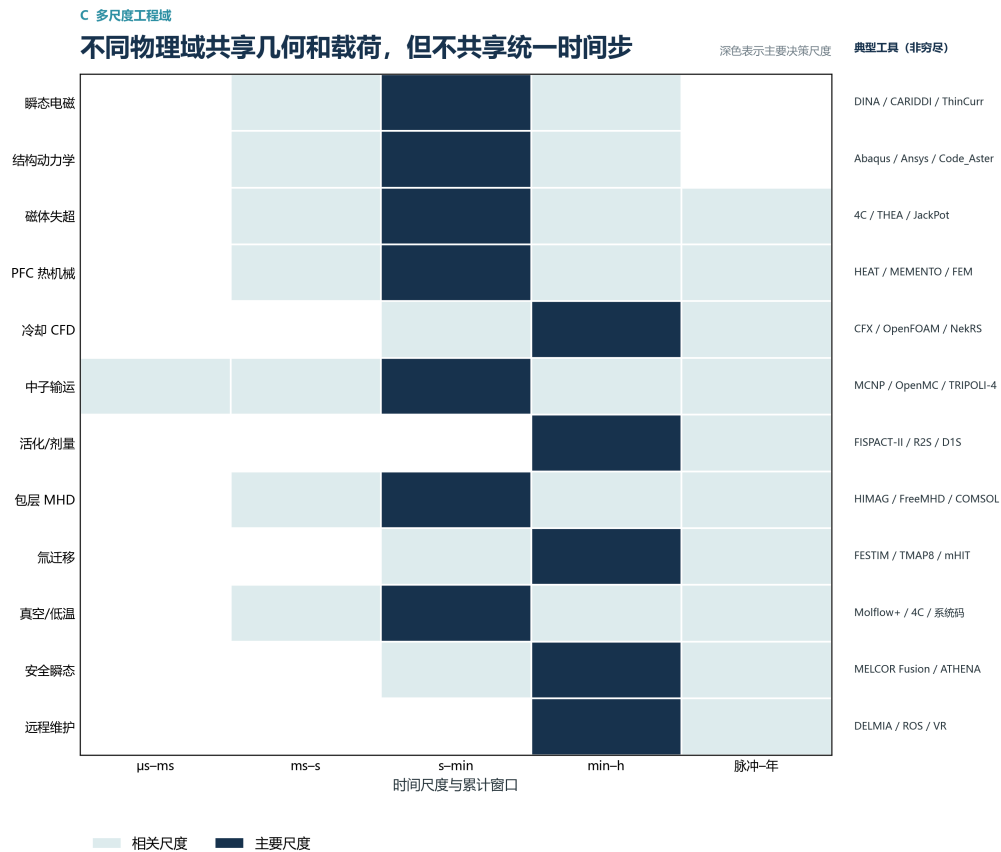


图 3 Tokamak 工程域的主要时间尺度及典型工具；工具清单非穷尽。作者绘制。

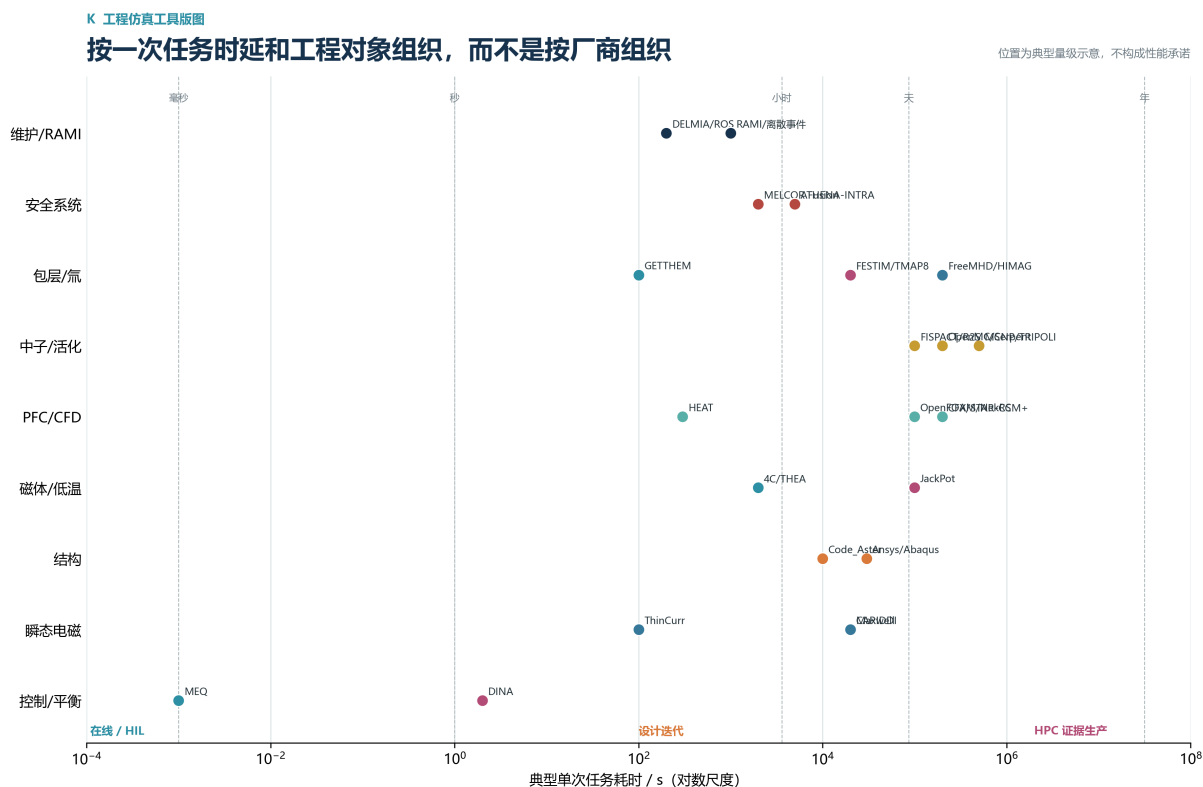


图 4 典型工程工具按任务时延和工程对象分布；位置是量级示意。作者绘制。

工程仿真工具可以按五层理解。第一层是几何与配置：CATIA、ENOVIA、AVEVA E3D、NX、Teamcenter、SALOME、FreeCAD、Paramak、bluemira。第二层是网格和场数据：HyperMesh、ANSA、SpaceClaim、Cubit、Gmsh、MEDCoupling、ParaView。第三层是通用求解器：Ansys、Abaqus、COMSOL、Simcenter、STAR-CCM+、OpenFOAM、Code_Aster、Code_Saturne、MOOSE、FEniCSx。第四层是聚变/核专用代码：CARIDDI、ThinCurr、HEAT、4C、MCNP、TRIPOLI-4、OpenMC、FISPACT-II、FESTIM、TMAP8、MELCOR Fusion。第五层是 workflow、验证和生命周期：System Coupling、preCICE、MOOSE MultiApp、SALOME YACS、DAKOTA、RAVEN、PLM/MBSE、试验数据系统与证据账本。

“开源/闭源”只是选型维度之一。开源工具优势是方程和接口可审计、便于自动化和长期保存；弱点常在用户支持、认证材料、几何鲁棒性和组织维护成本。商业工具优势是前后处理、非线性算法、工业材料模型、质量体系 and 供应商支持；弱点是许可成本、黑箱程度、版本锁定与自动化接口受限。高可信路线通常是“双轨”：商业平台承担设计生产，开放或独立代码承担交叉验证、自动化、长期可复现和方法研究。

4. 几何、CAD、网格与配置管理

4.1 工程几何不是“画得像”

Tokamak 的主 CAD 模型服务于接口、制造、装配和配置管理，往往包含数百万零件、微小倒角、紧固件、焊缝、密封、管线和电缆。直接把完整 CAD 投入有限元、CFD 或蒙特卡洛通常会失败：小面和缝隙导致网格畸变，中性文件丢失装配语义，布尔运算不稳，材料和部件标识也可能在简化中丢失。工程仿真需要建立从“设计主模型”到“分析主模型”的受控派生关系，而不是复制一份无人负责的几何。

ITER 的公开资料显示，机械设计以 CATIA V5、ENOVIA 为核心，厂房和管线设计使用 AVEVA E3D，工程数据库与 CAD 属性和可视化模型连接。[E1-E3] 这种体系的优势是成熟的装配、变更、权限和多机构协同；限制是模型庞大、许可和定制成本高，分析团队仍需要专门的 defeaturing、网格和材料映射流程。3DEXPERIENCE/ENOVIA、Teamcenter/NX、Windchill/Creo 在其他项目可承担类似 PLM 角色，但不能仅凭“虚拟孪生”营销名称替代物理验证。

开源路线中，SALOME 提供 CAD、SMESH、MED 场数据、可视化和求解器集成，适合建立可脚本化的核工程前后处理；FreeCAD/OpenCASCADE、CadQuery 适合参数化几何；Gmsh 适合自动网格；ParaView/VTK 适合大规模场数据；Paramak 和 bluemira 面向聚变概念设计快速生成参数化 Tokamak 几何。[E7-E9] 这些工具对概念设计和自动化很有价值，但复杂装配的几何修复、制造特征、版本权限和供应商交付仍弱于成熟 PLM。

4.2 几何派生与数据契约

建议为每个分析域定义“几何视图”：

- 电磁视图保留导电连续性、狭缝、绝缘断口、接触和线圈拓扑，删除对电流路径无影响的小特征。
- 结构视图保留载荷路径、焊缝、接触、预紧和支撑，允许使用壳/梁/子结构代替薄壁实体。
- CFD 视图抽取流体体积，保留粗糙度、旋流器、间隙和可能形成热点的歧管细节。
- 中子学视图保留材料厚度、缝隙和流道，合并紧固件但必须守恒质量和核素组成；对端口流道需保留流束路径。
- 维护视图保留包络、关节、碰撞、抓取点、视线和可达性，几何可轻量化但不能改变间隙。

每个派生模型要记录父 CAD 版本、简化规则、删除体积、质量差、材料映射、坐标系、网格版本和适用分析。STEP/IGES 适合中性 CAD 交换，但常丢失装配属性；Parasolid/JT 对特定生态更稳定；STL 只保留三角面，不适合作为唯一工程真源；DAGMC 的 H5M、OpenMC CSG、MCNP cell、MED、Exodus、VTK 各承担不同求解器数据。应以永久部件 ID 和材料 ID 连接这些表示。

5. 电磁、破裂载荷与真空室/被动结构

5.1 物理—工程接口

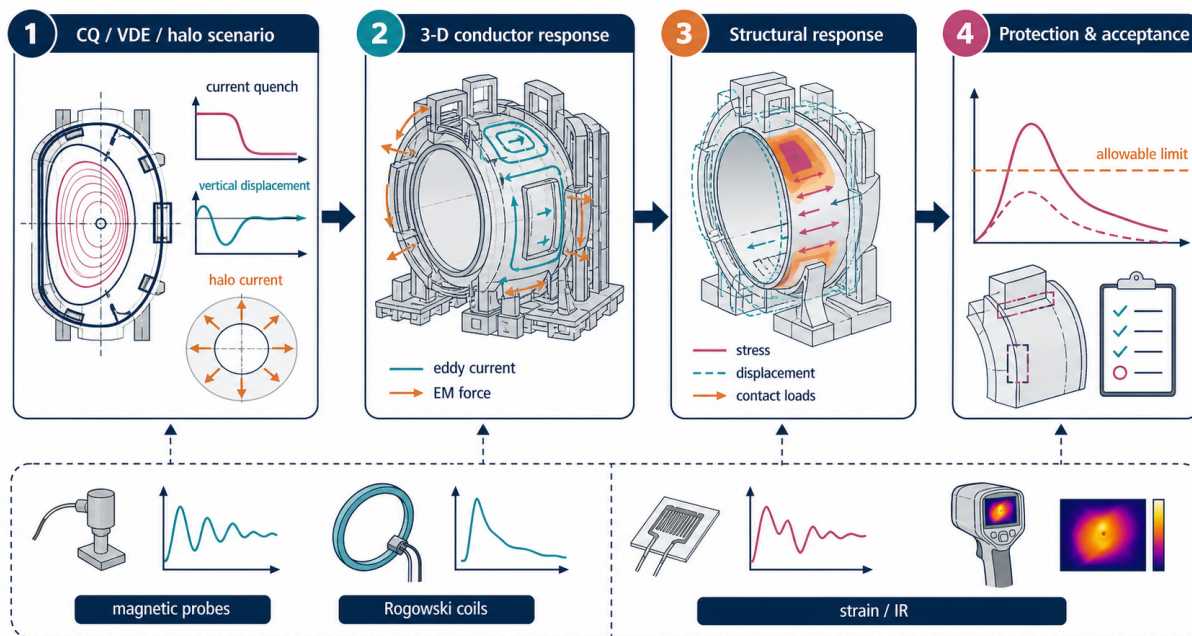


图 5 破裂场景从等离子体/电路到三维导体、结构与保护阈值。image-2 重绘，作者审校。

破裂工程分析至少包括电流猝灭、热猝灭、垂直位移事件、非轴对称 VDE、halo 电流、涡流、线圈保护动作和失控电子。等离子体模型输出随时间变化的等离子体电流、位置、形状、内感、线圈电流和可能的 halo 电流边界；三维电磁模型计算真空室、端口、被动板、PFC、包层和线圈中的电流，再由 $\mathbf{f} = \mathbf{J} \times \mathbf{B}$ 得到体力 and 净力/力矩，映射到结构模型进行瞬态动力学、接触、塑性和疲劳分析。

主要误差通常来自三处：第一，破裂场景本身并非确定，电流猝灭时间和 VDE 轨迹需要覆盖实验数据库与设计包络；第二，导电接触、绝缘缝和薄壁简化决定电流路径；第三，电磁网格到结构网格的力映射必须保持总力、总力矩和能量一致。局部 Maxwell 模型若使用空间均匀磁场，只能评估局部涡流密度，不能可靠给出整部件净力。JT-60SA 偏滤器研究明确使用 Ansys Maxwell 局部瞬态电磁结果作为 Workbench 结构输入，并以全局 APDL 模型交叉检查，说明简化模型必须标注用途。[E10]

5.2 Tokamak 专用电磁工具

is required.

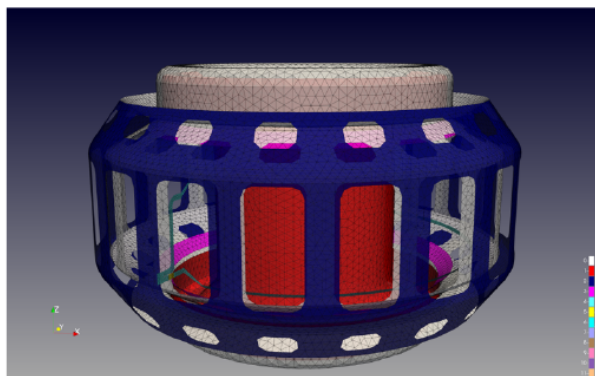


Figure 3. A visualization of the SPARC ThinCurr model where each color represents a different modeled resistivity region. These different resistivities are a result of either different thicknesses or materials.

图 6 SPARC ThinCurr 三维薄壁导体模型。来源：Hansen et al., arXiv:2309.15336, Fig. 3；原论文图，仅作参考。

DINA/MEQ 与自由边界平衡工具。它们给出等离子体—线圈—被动结构的轴对称动态骨架，适合场景和控制，但三维端口、狭缝、非轴对称 halo 和局部导体通常需要后续代码。工程数字线程应把它们的时间历程封装成版本化载荷服务。

CARIDDI。基于积分方程和边元/边元素思想，能够表示真实三维导体，长期用于 Tokamak 涡流、RWM 和 ITER 磁体电压/传感器研究；可与 MARS-F、JOEKE 等物理代码耦合。[E11-E12] 优点是适合复杂导体和电路耦合，聚变应用积累深；缺点是获取、建模和工作流更多依赖合作机构，工业前后处理不如通用 CAE。验证常采用解析问题、跨代码比较、磁测量和装置响应。

STARWALL。使用薄壁表面电流描述三维电阻壁，常与 JOEKE/VMC/CAS3D 等耦合；对壁模式、VDE 和等离子体—真空—导体相互作用高效。[E13] 优点是 MHD 强耦合、计算量低于体导体；限制是薄壁假设、复杂厚度电流和局部细节能力有限。与 CARIDDI 比较可检验薄壁适用性。

Open FUSION Toolkit: TokaMaker/ThinCurr/MUG。OFT 是开放的高阶有限元框架；TokaMaker 负责时变自由边界 Grad-Shafranov，ThinCurr 负责三维薄壁电磁，MUG 负责扩展 MHD。[E14-E15] 其 Python API、容器和开源代码便于自动化，ThinCurr 已用于 SPARC 与 DIII-D 被动/结构导体设计。短板是文档与行业认证仍在成长，复杂 CAD 预处理和正式核级质量流程需要项目补充。

VALEN。以三维薄壳有限元导体和等离子体模式/控制电路联合分析电阻壁模，曾用于 FIRE、DIII-D、MAST-U 等概念和装置。[E16] 优点是控制线圈、传感器和壁响应的系统分析；限制是代码传播、现代化接口和一般多物理集成不如 OFT/商业平台。

Keddy3D、PECAN 及机构代码。Keddy3D 是非轴对称薄壁涡流工具；PECAN 等框架把轴对称等离子体演化与三维导体载荷连接，并已用于紧凑型/球形 Tokamak 的破裂载荷研究。[E17] 这类代码能快速表达 Tokamak 专用假设，但公开文档、治理和跨装置基准通常有限，合作时必须冻结版本与验证算例。

5.3 通用电磁和结构平台

Ansys Maxwell/APDL/Mechanical。Maxwell 擅长三维低频电磁、线圈、涡流和场路耦合；Mechanical/APDL 擅长结构、接触、材料非线性和瞬态动力学；Workbench/System Coupling 可传递体力、温度和位移。[E18-E19] 优点是成熟网格、求解器、参数化、HPC 与工业支持，ITER/JT-60SA 等应用广；缺点是许可、版本依赖、黑箱和超大薄壁 Tokamak 模型的计算成本。APDL 脚本化模型可审计性通常优于纯 GUI，但需严格管理脚本和材料库。

COMSOL Multiphysics。AC/DC、结构、热、流体和自定义 PDE 在同一有限元环境内，适合局部强耦合、超导磁体、PFC 和反演问题；EAST 新偏滤器的涡流/halo 载荷分析曾用 measured discharge 数据重建并通过 COMSOL 计算。[E20] 优点是方程透明、快速原型和参数扫描；缺点是大型装配、接触/显式动力学、核工程证据包和大规模并行相对有限。

Simcenter MAGNET/3D、Opera/TOSCA、Abaqus。MAGNET 和 Opera 在低频磁体设计、线圈和磁性材料方面成熟；Simcenter 3D/Nastran 和 Abaqus 在结构、接触、疲劳、显式动力学和用户材料方面强。它们适合独立复核或已有企业生态，但 Tokamak 专用 halo/破裂和等离子体接口需要自建。

5.4 验证策略与装置案例

电磁载荷验证应从简单线圈/导体解析解开始，随后做 TEAM 类基准、薄壁/体导体跨代码比较、线圈电感和时间常数测量，再用装置磁探针、真空室电流、结构应变和破裂数据库验证。KSTAR 早期研究表明初始平衡场显著影响破裂垂直力；EAST 的方法用真实放电电磁数据重建；SPARC/DIII-D 的 ThinCurr 工作把设计参数与导体响应联系；ITER 的 CARIDDI 模型还用于计算磁体保护测量回路的感应电压。[E12,E15,E20-E21]

6. 超导磁体、结构、失超与低温

6.1 磁体工程的多层模型

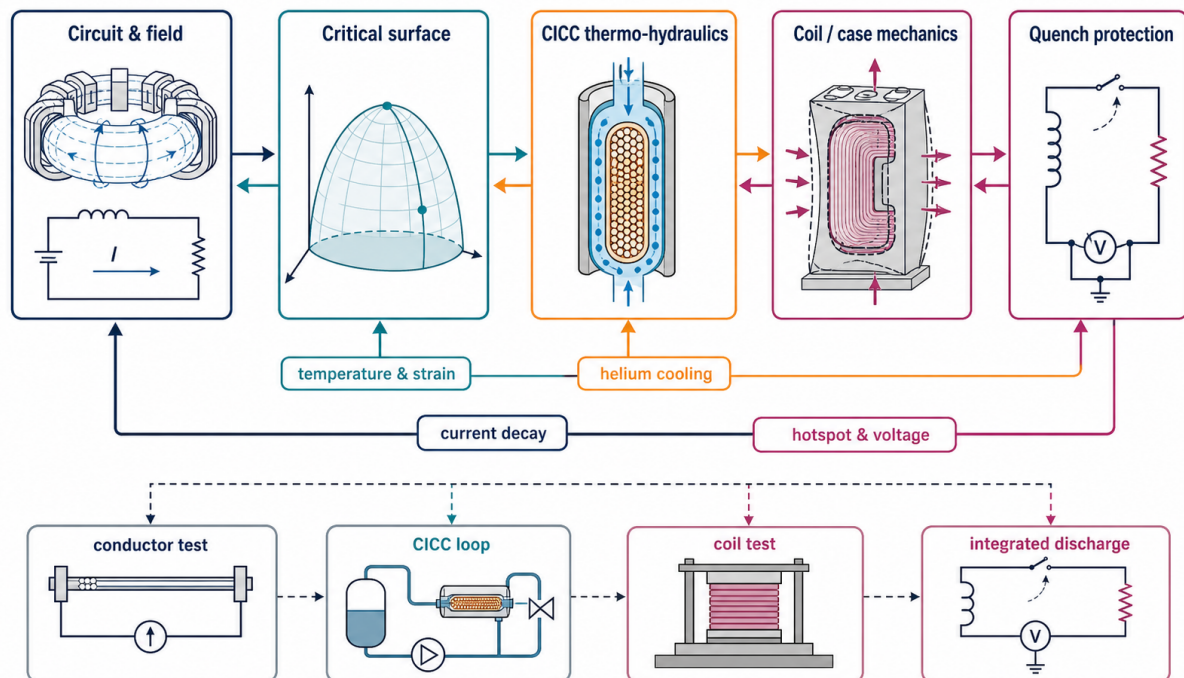


图 7 超导磁体从电磁、导体细观、CICC 热工水力到结构和保护的证据链。image-2 重绘，作者审校。

Tokamak 磁体模型至少有五层：电磁场和力；线圈盒/径向板/支撑结构的三维应力；CICC 或 REBCO 导体的电—热—流耦合；失超检测、保护电阻和电源电路；低温分配、泵、阀与冷箱。单一三维有限元无法同时解析上万公里电缆股线和整机，因此常用导体子模型、均匀化材料、子结构、等效电路和系统网络。

结构分析需考虑制造预应力、冷却收缩、线圈通电、面外场、故障载荷、接触滑移、绝缘脆性和循环疲劳。低温材料的弹性、断裂韧度和绝缘性能与室温差异很大；HTS 磁体还涉及强各向异性、接头电阻、电流重分配与无绝缘/部分绝缘绕组动态。

6.2 专用失超与低温工具

4C (Cryogenic Circuit, Conductor and Coil)。4C 面向聚变超导磁体的系统热工水力，把 CICC 绕组、线圈结构和低温回路耦合，可模拟整套 ITER 磁体系统和故障瞬态。[E22-E23] 它的价值在于尺度连接，而不是几何细节；验证包括 HELIOS 回路、ITER TF 磁体、EAST TF 冷却等实验/运行数据。优势是聚变专用、系统级和多年验证；限制是获取与专家门槛、材料和部件模型的项目化配置，以及与 PLM/实时数据的接口仍需工程化。

CryoSoft THEA、Gandalf、Mithrandir。THEA 对超导电缆进行热—水力—电分析，考虑电流共享、超临界氦和热扰动；Gandalf/Mithrandir 是 CICC 失超传播经典模型。QUELL 专门用于 Gandalf 验证，强调不调参、按实验边界预测多组工况。[E24-E25] 优点是导体尺度物理细致、历史验证深；缺点是商业/受限获取、老旧接口和整机耦合成本。

JackPot-ACDC。细化到绞线和接触网络，计算 CICC 电流分布、耦合损耗和磁场扰动；与 THEA 联合可把电磁损耗转成热扰动和失超稳定性。[E26] 优点是导体内部机理；缺点是几何/接触参数要求极高、计算昂贵，不适合整机在线使用。

ROXIE、QuenchPro、STEAM、FiQuS 及加速器工具。这些工具在超导磁体场、线圈优化、失超和保护方面积累丰富，可作为聚变项目的补充与交叉验证；但加速器磁体与 Tokamak 大型 CICC/HTS、脉冲和低温网络并不等价，应用前需明确扩展和验证。

6.3 通用平台与验证设施

Ansys、Abaqus、COMSOL、Simcenter/MSC Marc 常承担线圈盒、支撑、接触、预紧和热应力；Maxwell/Opera 计算场和力；Simulink/Simscape Electrical、PSCAD、PLECS、SaberRD 可建保护电路和电源。正确流程不是简单串联软件，而是验证能量守恒：磁能下降应与电阻耗散、外部电阻、涡流和热量一致；电磁力映射应守恒力矩；低温回路边界应与导体模型质量和焓流一致。

SPARC TF 模型线圈在约 20 T、40.5 kA 和巨大洛伦兹载荷下完成测试，公开论文报告电磁和冷却预测经两轮试验确认，是“模型—原型—装置”证据链的代表。[E27] ITER 依赖 SULTAN、分段/模型线圈、低温回路和工厂验收；JT-60SA 使用全球电磁—结构有限元模型；EAST 全磁体冷却数据已用于 4C 验证。[E21,E28] 数字孪生阶段应接入线圈电压、温压流量、应变和保护状态，但在线模型只能采用经高保真模型校准的降阶热网络和状态估计器。

7. 第一壁、偏滤器、热流体和材料寿命

7.1 从等离子体热流到部件寿命

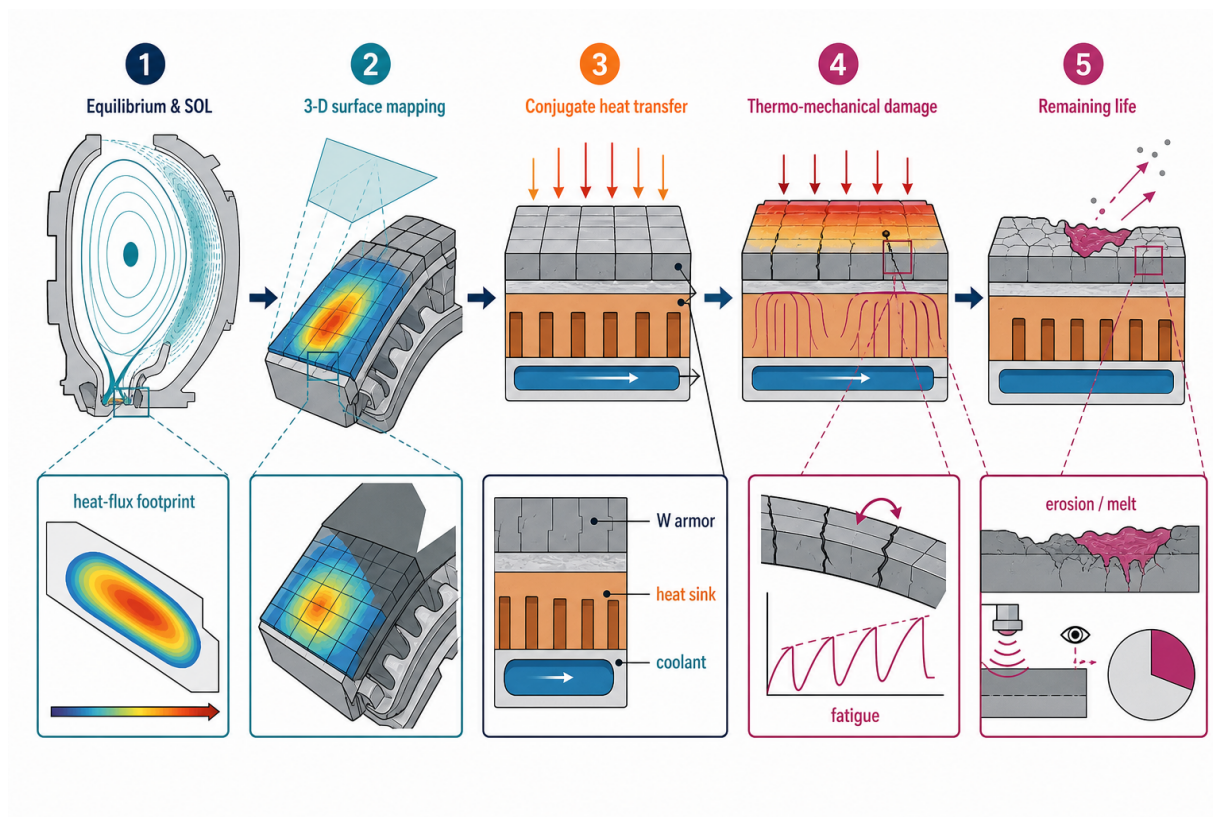


图 8 面向等离子体部件由热流到冷却、热机械损伤和寿命约束的转换链。image-2 重绘，作者审核。

PFC 工程链条通常是：平衡/三维磁场和边界等离子体模型给出磁力线、平行热流、辐射与粒子源；几何射线/轨道工具把载荷映射到 CAD 表面；热/CFD 模型计算表面温度、冷却剂温升、压降和临界热流裕量；结构模型计算热应力、塑性、界面应力、蠕变和疲劳；材料/氦模型计算重结晶、侵蚀、陷阱和滞留；寿命模型将真实脉冲谱而非单一峰值转成累计损伤。

最危险的接口错误包括坐标系与法向反转、热流重复投影、阴影与装配公差未考虑、表面载荷误作体热、冷却相关式超出验证范围，以及把名义材料性能用于辐照、焊缝或界面。对偏滤器而言，“平均 10 MW/m^2 ”不能描述局部边缘峰值、扫掠、瞬态和非均匀冷却。

7.2 HEAT 与聚变专用热负荷工具

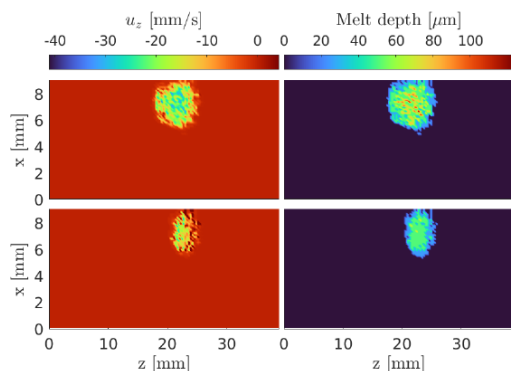


Figure 8: The melt depth and the velocity component (along gravity and the Lorentz force) at two different time instants, 3.79 s (top) and 3.89 s (bottom).

The melt pools are continuously displaced. Thus, the surface deformation is building up during every transient melting event. The temperature field on the evolving 3D domain is shown in Fig. 7. This output refers to the temperature at the center of all the cells, generated 4 s into the simulation.

The 2D data can be post-treated to visualize the domain deformation, instantaneous melt depth and depth-averaged velocity field. An example is presented in Fig. 8 for two different time instants. The illustrated melt pools

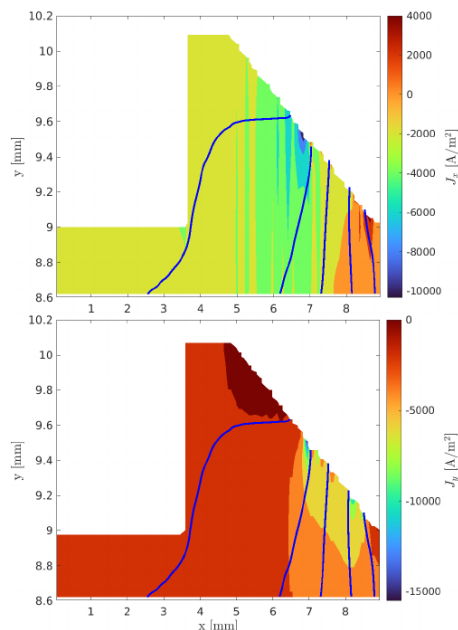


Figure 9: The replacement current density and its streamlines flowing through the sample at the 3.12 s time instant.

图 9 MEMENTO 熔层速度、熔深与替代电流密度。来源：Thorén et al., arXiv:2404.12904, Figs. 8–9；原论文图，仅作学术引用。

HEAT (Heat flux Engineering Analysis Toolkit) 把 CAD、磁场、MHD/平衡、射线、粒子轨道和热响应连接起来，输出 Tokamak PFC 的三维热载荷和温度；已用于 SPARC PFC 设计，并计划支持控制室应用。[E29-E31] 它的最大优势是明确位于物理—工程接口，能够快速评估阴影、限流器/偏滤器工况和三维场；与 DIII-D 红外测量比较提供了装置级验证。限制是热流宽度、跨场输运、发射率、表面状态和失控电子等仍需外部模型，复杂固体力学与寿命需交给通用 CAE。

MEMENTO/MEMOS-U。MEMENTO 模拟金属 PFC 熔化、薄液膜运动、电流、洛伦兹力和相变，面向强瞬态和异常事件；基于 AMReX 并行框架，已与 EUROfusion 专用试验和 JET 熔化事件比较，并用于 ITER/DEMO 预测。[E32] 优点是覆盖普通热传导/结构软件无法描述的熔融迁移；限制是浅水近似、材料表面和源项不确定度大，不能代替常规结构寿命评估。

其他专用工具包括失控电子沉积、离子轨道/中性粒子壁载荷、侵蚀再沉积和热流反演代码。它们应以表面/体积源项服务与 CAE 连接，且必须保留粒子能谱、入射角、时间分辨率和统计误差。

7.3 CFD、传热和结构工具

Ansys CFX/Fluent + Mechanical。CFX/Fluent 用于偏滤器冷却、包层歧管、泵阀和共轭传热，Mechanical 用于热应力、塑性与疲劳；两者通过 Workbench/System Coupling 传递场。ITER 偏滤器、EAST/CFETR 包层和诊断部件有大量公开应用。[E33-E35] 优势是工业湍流、沸腾/多相、网格和后处理成熟；限制是临界热流、辐照材料和超高热流下的壁面模型仍需专门验证。

STAR-CCM+、Simcenter 3D/Flomaster。STAR-CCM+ 适合自动网格、CFD、多相、共轭热和设计探索；Simcenter 3D 负责结构/声振/热，Flomaster/AMESim 负责一维流体网络。优势是同一工业生态和自动化；聚变

专用材料、核热和液态金属 MHD 仍需用户模型。

COMSOL。适合局部 PFC、诊断探头、传热—应力—电流—氚联合方程与参数反演，能快速建立自定义耦合。模型规模、求解稳健性和正式资格证据需项目评估。

OpenFOAM、Code_Saturne、NekRS。OpenFOAM 可扩展、生态广，适合自定义 MHD、共轭传热和复杂流动；Code_Saturne 源自 EDF 核/工业 CFD，可与 SYRTHES、Code_Aster/SALOME 连接；NekRS 是 GPU 友好的高阶谱元 CFD，适合高保真湍流和作为 Cardinal 组件。[E36-E38] 开源优势是方程与接口可审计，代价是模型开发、网格、质量保证和支持责任由项目承担。

Abaqus、Code_Aster、CalculiX、MOOSE Tensor Mechanics。Abaqus 在接触、循环塑性、蠕变、断裂、显式冲击和用户材料方面成熟；Code_Aster/SALOME 提供开放的结构热机械链；CalculiX 适合 Abaqus 风格的中小模型；MOOSE 适合与热流体、中子和氚同框架耦合。设计定型仍须按 SDC-IC、RCC-MRx、ASME 等准则把应力分类、塑性、疲劳、蠕变和辐照影响转成可接受性结论。[E39]

7.4 高热流试验与模型关联

ITER 偏滤器以钨单块—铜合金管—界面结构承受高热流，公开资料描述了 10-20 MW/m² 级高热流试验、数千循环和无损检查；有限元结果与热疲劳、热像和破坏检查联合判断界面缺陷与寿命。[E40-E42] 可靠的验证层次应包括：材料热物性与本构小样；扭带/冷却管压降与 CHF 试验；单块和小型 mock-up；全尺寸 PFU 高热流循环；装置红外/量热；拆卸后表面、界面和尺寸检查。模型校准不能只拟合峰值温度，还应同时比较温升/降温时间常数、空间热点、压降和残余变形。

8. 中子学、核热、屏蔽、活化和停机剂量

8.1 工程问题和数据链

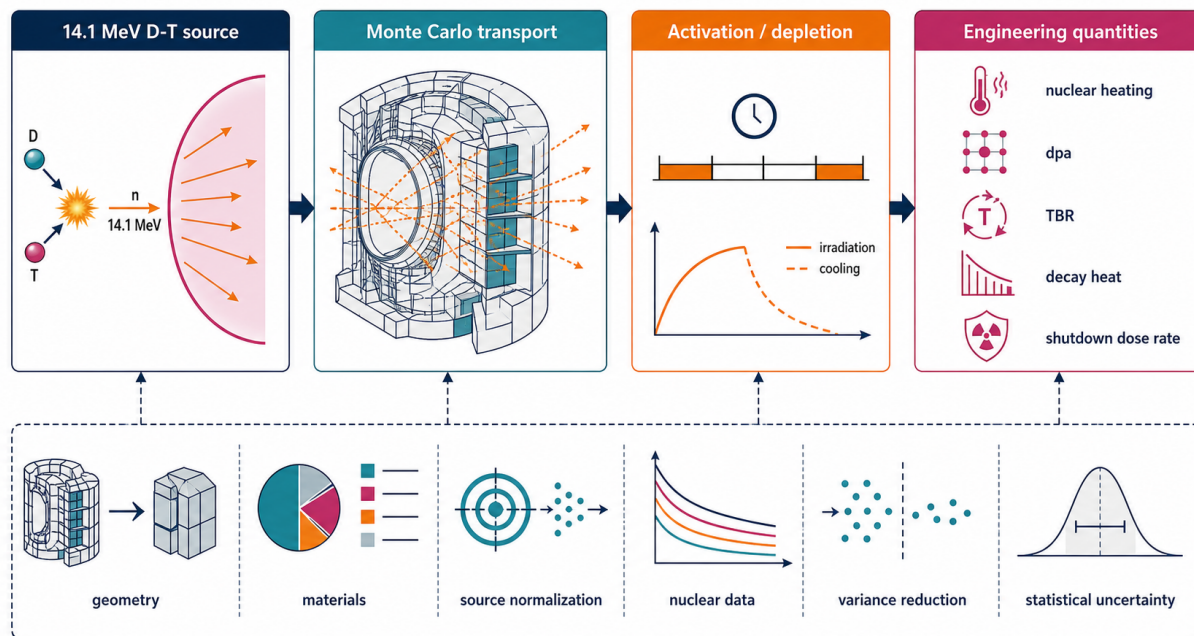


图 10 从 14.1 MeV D-T 源到输运、活化和停机剂量的工程证据链。image-2 重绘，作者审校。

D-T Tokamak 的中子学源于物理模型给出的 14.1 MeV 中子源强、空间分布、能谱和各向异性。工程中子学将其映射到配置受控 CAD，计算核热、通量、材料损伤（dpa）、氦/氢产生、磁体与电子学剂量、屏蔽、TBR、活化、衰变热、废物分类和停机剂量。几何缝隙与端口的 streaming、材料中微量元素、核数据库和方差降低对结果影响巨大。

蒙特卡洛结果的“统计误差 1%”只表示采样误差，并不包含几何、材料、源项和核数据不确定度。深穿透屏蔽必须检查 tally 空间分布、粒子历史、权窗偏差与多种方差降低设置；TBR 对几何厚度和材料体积分数敏感，必须守恒材料质量；停机剂量还要传播辐照历史、活化库存和衰变光子输运。

8.2 主要粒子输运代码

MCNP5/6。长期是 ITER、JET、DEMO 和许多装置的融合中子学参考工具，连续能量、复杂 CSG、固定源和方差降低成熟；优势是验证和用户经验深，缺点是美国出口/许可限制、输入几何维护困难、自动化接口相对传统。[E43]

TRIPOLI-4。CEA 的连续能量蒙特卡洛代码，是欧洲 DEMO/ITER 分析的重要独立路线；与 MCNP 在融合基准和 ITER 模型上交叉比较。[E43-E44] 优势是成熟的核工程质量和独立算法；获取受许可约束。

OpenMC。开源、现代 C++/Python、HDF5、MPI/OpenMP，支持 CSG 与 DAGMC CAD 几何、固定源、光子和越来越完整的融合功能。[E45-E47] 优势是自动化、参数化、可审计和与 MOOSE/Cardinal 集成；局限是部分融合功能、方差降低和正式设计认可积累仍少于 MCNP。SPARC 已使用快速可改的 OpenMC CSG 模型做诊断范围研究，并以高保真 CAD-MCNP 模型验证。[E48]

Serpent 2。以高性能连续能量蒙特卡洛、燃耗和多物理接口见长，已被纳入 MCR2S 等停机剂量基准；许可对学术和商业使用有区别。PHITS、FLUKA、Geant4 对高能粒子、次级粒子、辐射防护与探测器模拟有价值；但聚变

中子核数据库、TBR 和核热任务需针对性基准。SuperMC、cosRMC 在中国复杂 CAD 和 R2S 工作流中发展，并用于 ITER/CFETR 基准。[E49-E50] Shift/Denovo/ADVANTG/Attila 提供蒙特卡洛—确定论混合和全局方差降低，适合深穿透；许可和聚变验证深度不一。

8.3 CAD 转换、核数据和活化工具

DAGMC/MOAB 让 OpenMC、MCNP 等直接在三角化 CAD 边界上追踪粒子，减少 CSG 手工转换；代价是 CAD 修复、watertight、网格公差和求交性能。[E46] McCad 在 ITER/DEMO 工程 CAD 到 MCNP/TRIPOLI 转换中应用；SpaceClaim/MCAM/SuperMC 等提供其他转换路线。任何自动转换都必须做体积、表面积、材料、缝隙和随机射线检查。

FENDL 是 IAEA 协调的融合核数据库，包含输运、活化和剂量相关数据与积分基准；应与 ENDF/B、JEFF、JENDL、TENDL 等做敏感性分析。[E51-E52] NJOY/PREPRO/CALENDF 处理评价数据。FISPACT-II 计算活化、衰变热、剂量、dpa、气体产生、废物和协方差传播，公开资料称其用于 ITER、DEMO 和 STEP。[E53] ALARA、ORIGEN、CINDER 可承担库存/活化的独立或替代分析，但需确认 14 MeV 融合数据适用性。

8.4 停机剂量工作流与验证

R2S 将中子输运、空间活化、衰变光子源和光子输运分步；D1S 在一次蒙特卡洛中通过延迟伽马数据直接计算。MCR2S、R2Smesh、PyNE R2S、OpenMC R2S/D1S、D1SUNED、TRIPOLI D1S 等各有网格、存储、方差和许可权衡。OpenMC 的全开源 R2S 工作流已对 MCNP/FISPACT-II 组件进行验证，并用 Frascati Neutron Generator ITER 剂量基准与实验比较；JET D-T 运行提供了真实复杂装置的活化和剂量验证。[E54-E57]

正确验证包括：核数据库微分实验；FNG、OKTAVIAN、SINBAD 等积分基准；MCNP/TRIPOLI/OpenMC 交叉；材料样品活化；JET/ITER 材料样品、探测器和停机剂量。对数字孪生而言，高保真蒙特卡洛不在线运行，而是离线生成响应矩阵、代理模型和部件剂量/寿命系数，由实时中子监测和放电历史更新累计库存。

9. 包层、冷却回路、液态金属 MHD 与氚

9.1 包层的耦合网络

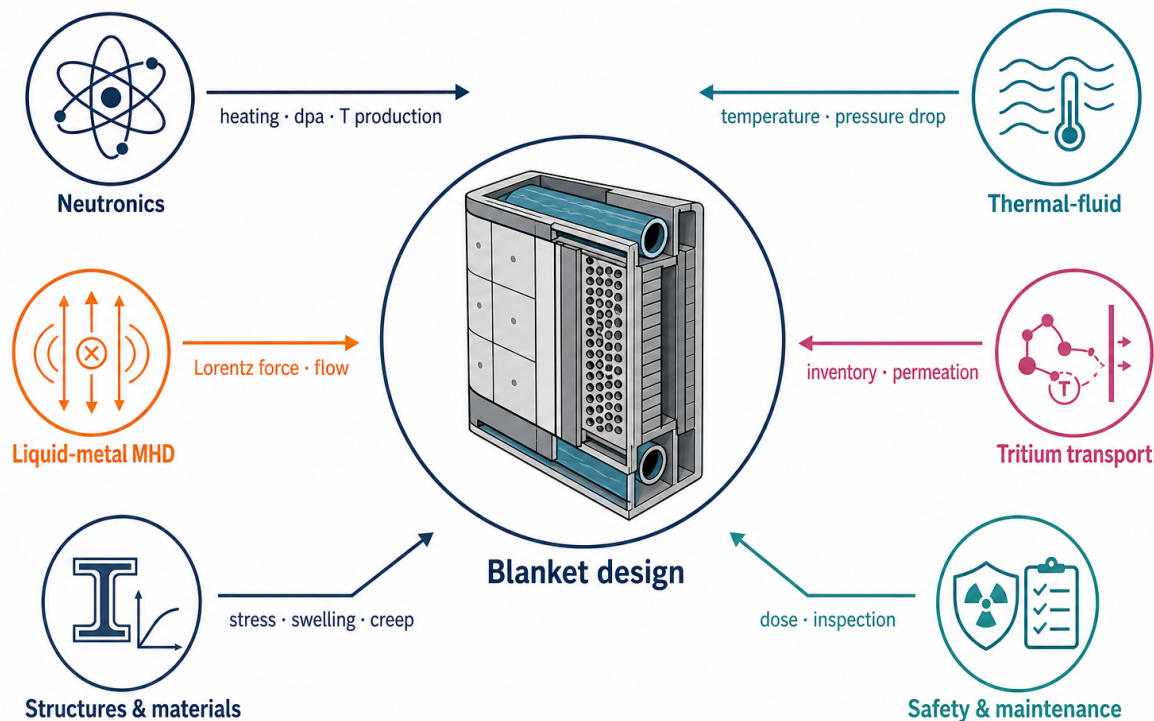


图 11 包层核—热—流—磁—氚—结构多物理耦合网络。image-2 重绘，作者审校。

聚变包层同时承担中子能量沉积、氚增殖、屏蔽和高品位热输出。工程模型必须耦合中子核热/TBR、固体热传导、冷却剂流动、结构热应力、液态金属 MHD、氚生成/扩散/提取、腐蚀和安全瞬态。概念筛选可弱耦合；当温度影响材料、电导率、氚释放和流体密度，或变形影响流道时，需要迭代或强耦合。

9.2 系统热工水力和 CFD

GETTHEM 是面向 EU DEMO 包层一次热传输系统的快速一维系统模型，已用于 WCLL 第一壁和瞬态参数分析。[E58] 它适合概念优化、控制和事故边界，不能解析三维热点。RELAP5/RELAP5-3D、TRACE、CATHARE、ATHENA 是核系统热工水力代码，可表示泵、阀、换热器、两相流和故障；欧洲 WCLL 研究已使用 RELAP5/Mod3.3。[E59] 其关联式源于裂变/常规回路，面向氦、PbLi、FLiBe 或特殊流道时必须验证。

三维局部模型常使用 CFX/Fluent、STAR-CCM+、OpenFOAM、Code_Saturne、COMSOL 和 NekRS；系统—CFD 联合用于以三维模型生成压降/传热闭合，再由一维网络做全厂瞬态。CFETR 集成设计平台已有把 MCNP 三维核热插值到 CFX 包层模型的公开实践，说明守恒场映射是关键基础能力。[E60]

9.3 液态金属磁流体工具

FreeMHD: validation and verification of the open-source, multi-domain, multi-phase solver for electrically conductive flows 6

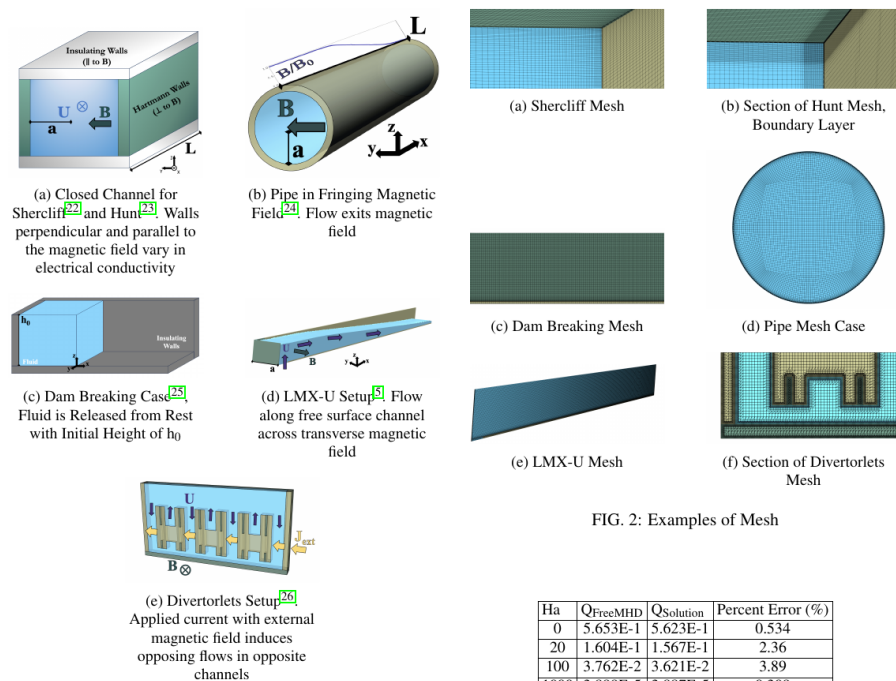


FIG. 1: All Case Setups

FIG. 2: Examples of Mesh

Ha	Q_{FreeMHD}	Q_{Solution}	Percent Error (%)
0	5.653E-1	5.623E-1	0.534
20	1.604E-1	1.567E-1	2.36
100	3.762E-2	3.621E-2	3.89
1000	3.899E-5	3.887E-5	0.309

TABLE VI: Non-dimensionalized flow rates compared to the analytical solution of the $Ha = 0$ Case^[27] and $Ha > 0$ Shercliff Cases Case^[16]

图 12 FreeMHD 的解析验证和实验确认算例与网格。来源：FreeMHD team, arXiv:2409.08950, Figs. 1–2; 原论文图，仅作参考引用。

强磁场使导电 PbLi/Li 产生巨大 MHD 压降、流动重分布、自然对流和界面效应。HIMAG、MHD-UCAS 是融合液态金属专用研究代码；COMSOL、CFX/Fluent、OpenFOAM 通过电势/磁感应方程和用户模型处理；FreeMHD 是开放的多域、多相、自由表面导电流求解器，公开工作提供解析、跨代码和实验 V&V。[E61-E63] 高 Hartmann 数会产生极薄边界层，常规网格成本巨大；电绝缘流道插件、接触电阻、磁场非均匀和湍流模型必须用 MaPLE、MaPLE-U、MEKKA、DCLL 回路等实验验证。

9.4 氦输运、库存和燃料循环

FESTIM 基于 FEniCS/Python，模拟多材料 1D/2D/3D 氢同位素扩散、陷阱、表面和热耦合，可与 OpenMC 核热/产氦连接，已有单块、TDS、ARC 包层和渗透应用；项目维护公开 V&V 报告。[E64-E65] 优点是开放、可扩展和自动化；限制是材料陷阱、表面反应和辐照数据不确定度很大，系统级管网需外部模型。

TMAP7/TMAP8。TMAP 是 ITER 和融合安全长期参考；TMAP8 基于 MOOSE，支持系统级质量与热传输、SQA、校准、敏感性和不确定度，并复现 TMAP4/7 验证和实验算例。[E66-E67] 优点是质量体系与 MOOSE 多物理耦合；局限是仍在快速发展，完整燃料循环与复杂表面模型需继续验证。

TESSIM-X、MHIMS、mHIT。TESSIM-X 在欧洲 WCLL/HCPB 氦研究中用于固体扩散—陷阱与系统输入；MHIMS 和 mHIT 提供其他同位素输运和跨代码验证。[E68-E69] 获取方式、维护和接口开放性不一。SALAMANDER 组合 MOOSE、Cardinal/OpenMC 和 TMAP8，目标是包层中子—热—氦多物理；Cardinal 把 OpenMC、NekRS 与 MOOSE 内存耦合，已有 HCLL 和参数化 Tokamak 教程。[E70-E72] 它们代表开放集成方向，但演示模型距离完整工程包层、材料数据库和核级验证仍有明显差距。

数字孪生阶段应把氦模型分成三层：材料/部件高保真离线模型；管网/库存动态模型；在线质量平衡与泄漏检测。高保真模型提供渗透和释放闭合，在线模型用流量、浓度、温度、压力和辐射监测更新库存，并显式显示未观测库存和守恒残差。

10. 真空、低温、电源、加热和厂用系统

10.1 真空系统

Tokamak 真空工程同时包括分子流、过渡流、黏性流、出气、等离子体排气、低温泵再生、漏率和事故进气。Molflow+ 是 CERN/ESRF 开源试验粒子蒙特卡洛工具，适合任意复杂几何的超高真空分子流、泵速和压力分布，支持 STL 导入与多核计算。[E73] 优点是开放、快速、几何直观；限制是自由分子假设，当平均自由程接近几何尺度、存在等离子体化学、表面饱和或强瞬态时需要 DSMC、CFD 或网络模型。验证应从解析电导、已知压力分布和泵速试验开始，再与装置压力计和气体注入试验比较。

AVOCADO 等试验粒子代码用于 ITER 中性束 SPIDER 等大型真空系统气体密度；公开工作将不同尺度模型与实验/工程测量联系。[E74] COMSOL Molecular Flow、Ansys Fluent/CFX、DSMC 工具 (SPARTA、DS2V/3V) 可覆盖不同 Knudsen 区域。系统级泵、阀、容积和控制可用 Modelica、Simscape、AMESim、EcosimPro 或自建网络。数字孪生需要把表面出气和泵性能视为随运行历史变化的状态，而非固定系数。

10.2 低温与公用工程

除磁体专用 4C/THEA 外，低温厂和分配网络常采用 EcosimPro/PROOSIS、Modelica (Dymola/OpenModelica)、Simcenter Amesim、Flomaster、Aspen HYSYS、gPROMS 建立换热器、压缩机、阀和控制系统。它们适合秒到小时的启动、停机、故障和控制优化；局部换热、两相、超临界氦或旋转机械则由 CFD/专用相关式提供闭合。选择时应考察物性库、因果/非因果建模、刚性 DAE 求解、实时导出 (FMI) 和控制系统接口，而非仅看流程图界面。

10.3 电源、保护和电网

PF/CS/TF 电源、快速放电、失超保护、加热系统与厂用电涉及从微秒开关到秒/分钟电网的多时间尺度。PSCAD/EMTDC、EMTP-RV、PLECS、PSIM、SaberRD、MATLAB/Simulink/Simscape Electrical 适合电力电子、保护逻辑、硬件在环和控制代码生成；DigSILENT PowerFactory、PSS/E 适合电网潮流、稳定和并网；Ansys Twin Builder、Modelica 适合与热/机械降阶模型联合。

与物理的接口包括线圈电流需求、磁场轨迹、加热/电流驱动功率和 plasma control 参考；工程返回电压、电流、能量、热负荷、谐波、故障裕量和执行器动态。DINA/MEQ 如果使用理想电压源而忽略整流器饱和、延迟、母线和保护，就不能作为控制硬件验收模型。路线应是控制模型—电力电子平均值模型—开关模型—控制器硬件在环逐级验证。

10.4 加热、电流驱动与诊断工程

NBI、ECH、ICRH 和 LHCD 的波/束物理通常由专用物理代码计算，但工程仿真负责高压绝缘、加速栅热变形、RF 窗口和传输线、真空、冷却、结构与辐射。常用工具包括 CST Studio/HFSS/COMSOL RF、Opera/Maxwell、ANSYS/ABAQUS、CFX/Fluent、Molflow/AVOCADO、Geant4/MCNP。ITER 中性束测试设施 SPIDER/MITICA 体现了“部件/子系统试验先于装置”的验证路径：束光学、气体密度、热量计和高压绝缘必须用测试设施数据联合校准。

诊断工程还需计算电磁兼容、辐射损伤、视线、热负荷、真空窗口应力和校准。中子/伽马诊断可用 Geant4、MCNP/OpenMC；光学可用 Zemax/Code V/TracePro；电磁与结构用通用 CAE。工程模型应生成合成诊断响应，物理重建再用同一响应函数处理，避免“仿真真值”与传感器读数直接比较。

11. 安全、事故、厂房与环境

11.1 安全分析不是普通 CFD 的放大版

融合安全关注放射性库存和能量源：真空室失真空（LOVA）、冷却剂侵入真空室（ICE）、失冷（LOCA/LOFA）、磁体失超、氦泄漏、粉尘、蒸汽—钨/铍反应、氢爆炸、低温窒息、消防和外部事件。安全模型需要保守边界、事故序列、屏障、过滤/通风和释放路径，目标是证明后果和裕量，而不只是预测“最可能”行为。

MELCOR Fusion。MELCOR 原为裂变严重事故综合代码，INL 对其进行融合修改并用于 ITER 初步安全报告、ARIES、DEMO、DTT 等；覆盖热工水力、气溶胶/蒸汽、放射性迁移和厂房控制体。[E75-E78] 优点是系统级事故链、核安全质量和长期应用；限制是许多融合材料反应、磁体/液态金属/氦现象依赖经验模型，当前 1.8.6 Fusion 与 MELCOR 2.2 的能力整合仍在推进。

ATHENA-INTRA、RELAP5、CATHARE、TRACE、ASTEC。ATHENA/RELAP 类用于多流体系统热工，INTRA/CFD 用于厂房压力和流动；ASTEC 是欧洲严重事故平台。它们可提供独立安全路线，但面向融合需专门模型与验证。[E76] CFD (Fluent、CFX、OpenFOAM、Code_Saturne、FDS) 适合氢/蒸汽/气溶胶在房间内局部分布，不能替代系统级事故边界；通常由系统代码给源项和边界。

安全验证主要依赖分离效应试验和积分事故设施，而真实聚变电厂事故数据不存在。应采用层次：守恒和制造解；裂变/通用热工基准；ICE/LOVA、粉尘和化学反应专用试验；ITER 质量 pedigree 与独立审查；敏感性、不确定度和保守性证明。安全模型必须冻结版本、输入和审查记录，不能像研究脚本一样随意更新。

11.2 厂房、屏障与防护

厂房设计使用 AVEVA E3D、CATIA/3DEXPERIENCE、Revit/Navisworks、Bentley 等进行管线、HVAC、电缆和碰撞；结构抗震和设备鉴定使用 ANSYS、Abaqus、Nastran、SAP2000 等；辐射屏蔽使用 MCNP/TRIPOLI/OpenMC/Attila；通风与释放使用系统代码和 CFD。模型必须连接安全分类、抗震分类、房间/屏障、阀门状态和穿透件，PLM/BIM 模型本身并不等于事故模型。

12. 远程维护、装配、制造与 RAMI

12.1 远程维护仿真

核阶段 Tokamak 的内部部件在停机后不可人工接近。远程维护模型要回答：机械臂和运输器是否可达；视线和传感器是否足够；抓取、切割、焊接、解锁和搬运顺序是否可执行；柔性、间隙、定位误差和接触力是否超过容限；任务用时、故障恢复和热室物流是否满足可用率。

DELMIA、Tecnomatix Process Simulate、Visual Components、KUKA.Sim、ABB RobotStudio 提供工业机器人、工艺和数字样机；CoppeliaSim、Gazebo/Ignition、ROS 2、MoveIt、Drake、MuJoCo 提供开放/研究型机器人、运动规划和控制；MSC Adams、Simpack、RecurDyn 用于多体动力学和柔性载荷；VR/AR 与触觉平台用于操作员训练。

ITER 使用 CATIA/ENOVIA/DELMIA 管理设计和关键工艺，F4E 为偏滤器远程维护采用物理基础 VR 仿真并计划在 DTP2 试验设施验证。[E79-E81] JET 自 1990 年代起把 CATIA 轻量化模型、VR、计算机辅助遥操作和真实停机经验结合；DTT 用系统工程和虚拟仿真设计超冗余机械臂。[E82-E84] 这些案例说明维护孪生必须与真实机器人标定、力反馈、摄像机、工具磨损和任务日志同步，而不是只做动画。

12.2 装配和制造仿真

复杂 Tokamak 的装配仿真包括吊装、焊接顺序、重力变形、测量配准、公差叠加、热处理、残余应力和现场物流。DELMIA/Process Simulate 适合工艺与资源；Abaqus/Ansys/Simufact/MSC Marc 适合焊接、成形和残余应力；3DCS/CETOL/VisVSA 适合公差；Navisworks/Synchro/4D PLM 适合进度与空间冲突。ITER 的全尺寸 Trial, Test and Training Facility 用一比一真空室扇区复刻安装空间，体现了数字工艺必须通过实体训练验证。[E85]

增材制造、HIP、钎焊和扩散连接可用热—冶金—力学模型，但界面缺陷和制造散差常决定 PFC 寿命，必须与 NDE、切片、热像和高热流试验关联。制造仿真输出应回写实际几何、残余应力和材料批次，而不是假设 as-built 等于 as-designed。

12.3 RAMI、维修物流和可用率

RAMI（可靠性、可用性、可维护性、可检查性）把部件失效率、维修时间、备件、远程维护任务、共同原因故障和计划停机转成电厂可用率。常用工具包括 ReliaSoft BlockSim/Weibull++、Isograph Availability Workbench、MAROS、Relyence、FaultTree+，以及 Python/R/SimPy 自建离散事件模型；PROCESS、FUSE 和系统代码也包含简化可用率/成本模块。

优点/缺点要区分：商业 RAM 工具有成熟的故障树、可靠性框图、数据拟合和审计；但融合缺少大样本失效数据，漂亮的可用率数字往往由专家假设主导。开源离散事件模型透明、易与维护布局耦合，却需要组织自建质量和用户界面。验证来自 JET/现有装置维护记录、工业同类设备、遥操作任务试验和贝叶斯更新。数字孪生应动态更新健康状态和维修时间分布，但必须显示数据稀疏性与认知不确定度。

13. 材料、结构准则和寿命证据

Tokamak 结构寿命受循环电磁/热载荷、蠕变、疲劳、断裂、辐照脆化、肿胀、氦/氢产生、腐蚀和焊缝影响。有限元给出的 von Mises 应力不是最终结论；工程人员还要按材料和结构准则完成应力分类、塑性失稳、渐进变形、疲劳、蠕变—疲劳、断裂和屈曲评定。

ITER 在真空容器和在室内构件上使用 RCC-MRx、SDC-IC 等规则；SDC-IC 专门考虑中子、强热流、时变电磁和真空等单一常规规范无法完整覆盖的环境。[E39,E86] Ansys/Abaqus/Code_Aster 负责求解，nCode DesignLife、fe-safe、FEMFAT、NASGRO、Franc3D、Zencrack 等用于疲劳/断裂；材料数据库和自定义用户材料决定可信度。

FISPACT-II 用中子谱计算 dpa、气体和核素；分子动力学/位错动力学/相场和 CALPHAD 工具（LAMMPS、MOOSE、MARMOT、Thermo-Calc、OpenCalphad）研究微观机制；工程有限元需要从实验和多尺度模型获得辐照后本构。当前最大差距是反应堆相关 14 MeV 中子、温度、应力和剂量下的数据不足。IFMIF-DONES、材料试验反应堆、离子辐照和代理试验只能部分覆盖，因此寿命预测应使用不确定度和定期检查/更换策略，不能伪装成精确年限。

14. 物理、工程与实验的集成方法

14.1 三条数字线程

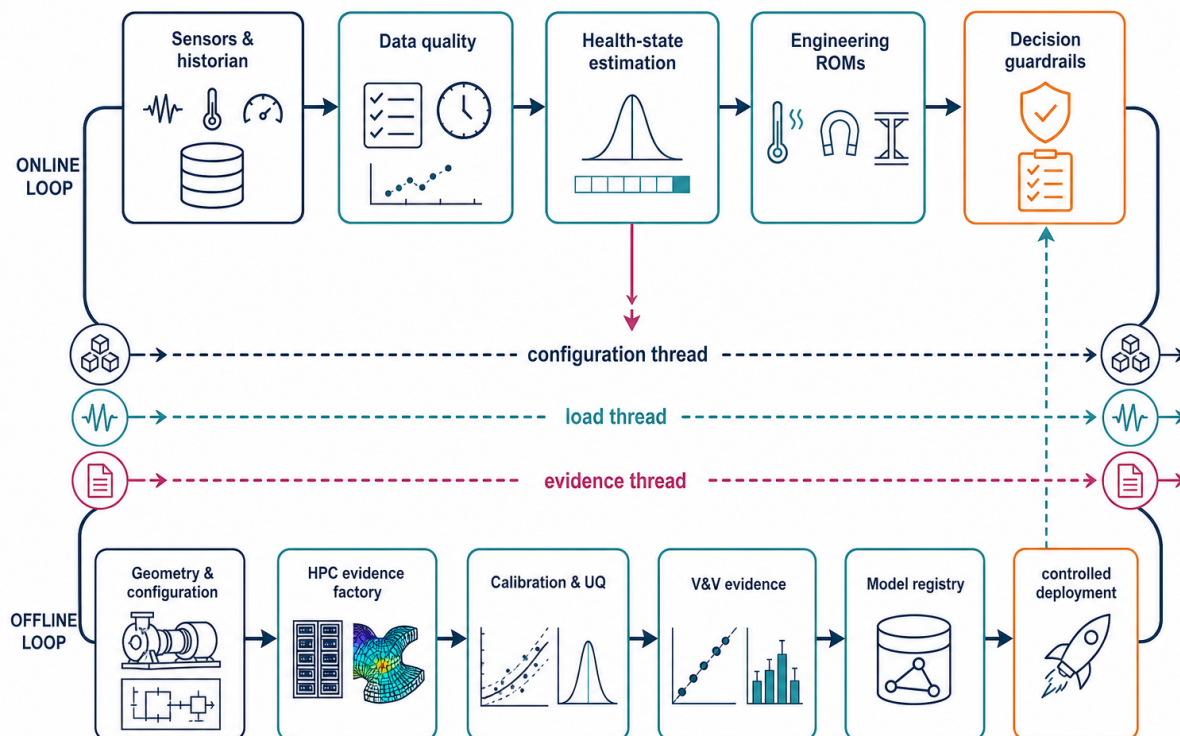


图 13 在线状态环与离线证据工厂共享配置和载荷数字线程的参考架构。image-2 重绘，作者审校。

建议把 Tokamak 工程仿真组织成三条相互连接但责任不同的数字线程。

场景—载荷线程从等离子体场景、线圈和控制开始，输出破裂/VDE/halo、电磁力、PFC 热流、辐射、中子源和脉冲谱。DINA/MEQ、TRANSP/JINTRAC、JOEKE/DREAM、SOLPS/HEAT、TokaMaker/ThinCurr 等属于这一线程。它的关键不是最高保真，而是覆盖设计包络、明确概率/不确定度并生成工程可消费格式。

资产—响应线程以 CAD/PLM 配置为核心，把载荷映射到真空室、磁体、PFC、包层、管路、厂房和机器人，输出应力、温度、流量、剂量、库存、寿命和任务时间。Ansys、Abaqus、COMSOL、MCNP/OpenMC、CFX/OpenFOAM、4C、FESTIM/TMAP8、MELCOR 等属于这一线程。

试验—证据线程连接材料小样、部件试验、回路、模型线圈、高热流装置、装置放电、校准和维护记录，负责模型校准、盲预测、误差分解和适用域。它必须保存原始数据、传感器响应、处理脚本、实验配置和比较指标。

三条线程通过永久资产 ID、场景 ID、材料批次 ID、坐标系和时间基准连接。IMAS 可承载等离子体和放电语义；PLM/工程数据库承载产品结构和配置；HDF5/NetCDF/VTK/Exodus/MED 承载场；FMI/SSP、gRPC/REST、消息总线承载模型服务；证据账本记录版本、输入、软件环境、审查和适用用途。不能假设一个格式包办一切。

14.2 载荷转换服务

把载荷映射做成正式服务，是从物理网站/代码集合走向工程数字孪生的第一项高价值工作。服务应包含：

1. 坐标系与几何配准：物理网格、CAD、分析网格和传感器坐标统一；保留变换矩阵和误差。

2. 时间重采样：物理模型微秒/毫秒输出转换为结构动力学、热和系统模型时间步，避免滤掉峰值或制造虚假高频。
3. 守恒映射：面热流守恒总功率；体力守恒总力与力矩；核热守恒积分能量；质量/氙映射守恒库存。
4. 不确定度传播：不是只传递均值；对 CQ 时间、halo 非对称、热流宽度、中子源和材料参数进行样本/响应面传播。
5. 适用域检查：加载场景超出训练/验证范围时拒绝或降级，不能静默外推。
6. 证据元数据：输入来源、代码版本、网格、误差、审核人、日期和指定用途与结果一同发布。

实现技术可采用 Python/xarray/h5py、VTK/MEDCoupling、MOAB、preCICE、MOOSE Transfers、Ansys System Coupling 或商业 PLM 接口。选型原则是守恒、可测试和可追溯，而不是接口数量。

14.3 耦合强度如何选择

单向顺序耦合适合载荷不受响应显著影响的情况，如中子核热到稳态热传导、磁场到小变形结构。优点是清晰和稳健，缺点是忽略反馈。分区迭代耦合适合热—流—结构、核热—温度—密度和 MHD 流动；可用 preCICE、System Coupling、MOOSE MultiApp。优点是复用成熟求解器，风险是时间同步、松弛和接口能量误差。单体耦合在 COMSOL/MOOSE/FEniCS 中同时求解多个场，适合强反馈和局部模型；风险是方程、尺度和预条件复杂，模型更难独立验证。降阶/代理耦合适合在线孪生和优化，但必须有高保真训练域、误差估计和超域检测。

工程上应从最弱但足够的耦合开始，并用无量纲敏感性或迭代差判断是否升级。把所有求解器“实时强耦合”通常既不稳定也不可验证。

14.4 与实验协同的标准 workflow

I 工程模型可信度金字塔

“与另一个代码一致”只是证据的一层

越接近系统级，数量更少、成本更高、代表性更强



图 14 工程模型从代码验证到装置盲预测的证据金字塔。作者绘制。

每个关键模型应有一张“验证矩阵”：需求量、模型输出、测量方法、实验尺度、比较指标、不确定度、通过阈值和模型更新规则。例如 PFC 热模型可以同时比较 IR 表面温度、嵌入热电偶、冷却剂量热和压降；若只拟合 IR 峰值，界面热阻与体热容可能不可辨识。磁体模型应同时比较电压、温度、压力和流量；只拟合失超时间会隐藏错误能量分配。

推荐使用盲预测：实验团队先冻结边界和不确定度，建模团队在不知道结果时提交预测区间，再揭示数据。模型校准数据和确认数据分离；同一数据不能既调参又宣称独立验证。模型更新后，回归基准和历史装置回放应自动重跑。

15. 主要装置和项目如何组合工具

15.1 ITER

ITER 是工程工具链最完整的公开案例之一。CATIA/ENOVIA 维护 Tokamak 机械配置, AVEVA E3D 维护厂房/管线, 工程数据库连接属性和文档。[E1-E3] 电磁/结构分析大量使用 Ansys、Abaqus、Maxwell、CARIDDI 及机构工具; 磁体依赖全球 FE、4C/THEA/Gandalf/JackPot 和 SULTAN/模型线圈/回路试验; 偏滤器以 Ansys 热机械、CFD、高热流试验和 NDE 定型; 核分析以 MCNP、TRIPOLI-4、FISPACT、D1S/R2S 和 FNG/JET 基准; 事故分析使用 MELCOR Fusion; 远程维护以 CATIA/DELMIA、VR 和 DTP2/全尺寸设施验证。

优势是核工程质量、部件验证和跨机构独立复核; 不足是工具和数据分散、许可与访问复杂、许多接口仍是项目文件/脚本, 实时装置数据尚未形成公开的工程孪生闭环。对本项目最值得学习的是配置治理和分层资格, 而非复制全部软件。

15.2 SPARC

SPARC 公开展示了紧密的 physics-engineering workflow: HEAT 把磁场/等离子体场景映射到 PFC CAD; ThinCurr 支持被动与结构导体/REMC 设计; MCNP CAD 模型承担高保真核设计, OpenMC CSG 模型承担快速诊断扫描并与 MCNP/ToFu 验证; TF 模型线圈把电磁、结构和冷却预测通过 20 T 级试验确认。[E15,E27,E29-E31,E48] 优势是快速迭代、物理—工程共同建模和原型验证; 公开信息不足以证明全套配置、核级寿命和运行孪生能力, 商业内部工具边界也不可见。

15.3 JT-60SA

JT-60SA 采用全球电磁—结构 FE 模型评估超导磁体, Ansys Maxwell 局部模型与 APDL 全局模型评估偏滤器 disruption 涡流, 并把体力传给 Workbench 结构分析。[E10,E28] 场景分析工具连接磁体、电源和运行约束。优势是 ITER 卫星装置的完整超导工程实践; 需要在运行阶段进一步用磁体、结构和 PFC 实测数据闭环更新。

15.4 EAST 与 CFETR

EAST 的 COMSOL 偏滤器载荷模型使用真实 disruption 测量重建; PFC 烘烤和探针研究使用 COMSOL/CFX/ANSYS 并与量热或运行数据比较; 4C 使用 EAST TF 全磁体冷却数据验证。[E20,E35,E87] CFETR 概念设计使用 MCNP/SuperMC/cosRMC、FISPACT、CFX/ANSYS、RELAP/系统代码和集成平台; 公开的 MCNP 核热到 CFX 插值模块强调核热守恒。[E49-E50,E60] 优势是装置数据与未来堆设计连接; 挑战是不同机构代码、数据模型、验证等级和配置的统一。

15.5 JET、MAST-U、DIII-D 与 DTT

JET 为中子活化、停机剂量、材料样品和远程维护提供稀缺的 D-T/核化运行数据, 适合验证 MCNP/TRIPOLI/FISPACT/R2S 和维护模型。[E55-E57,E82] DIII-D 的红外和三维磁场实验用于 HEAT 验证, ThinCurr 用于导体设计。[E15,E30] MAST-U 有 VALEN 等三维壁/控制模型和现代 PFC/维护经验。DTT 面向 DEMO 排热, 工程工具覆盖 Ansys/CFD、MELCOR 和超冗余远程维护虚拟仿真。[E78,E84] 这些中型装置的价值在于快速实验和模型证伪, 不能只被看作 ITER 的低参数缩比。

15.6 KSTAR 与其他装置

KSTAR 的破裂涡流/垂直力研究显示等离子体初始平衡和被动板拓扑会改变支撑载荷; 其超导运行、长脉冲热负荷和冷却数据可用于磁体/PFC 模型。[E21] Alcator C-Mod、TCV、WEST、NSTX-U、HL-2M 等也分别提供高场破裂、边界热流、长脉冲 PFC 和球形 Tokamak 结构的验证场景。工具移植必须重新验证几何、材料、参数和测量响应, 不能因为代码曾在另一装置使用就自动获得可信度。

16. 工具优缺点和推荐组合

16.1 商业主干 + 开放验证轨

对需要与供应商、制造和核质量体系协同的大型项目，推荐以 CATIA/ENOVIA 或 NX/Teamcenter 作为配置主干，Ansys/Abaqus/CFX/Maxwell/Simcenter/COMSOL 作为设计生产工具，MCNP/TRIPOLI/FISPACT 和 MELCOR 作为核分析主干；同时配置 SALOME/Gmsh/ParaView、OpenFOAM/Code_Aster、OpenMC/DAGMC、OFT/ThinCurr、FESTIM/TMAP8/MOOSE 作为开放自动化与独立验证轨。

优点是保留工业效率、供应商支持和核证据，同时降低单一厂商锁定并促进自动化。代价是需要维护双模型、数据转换和差异解释。双轨不是每个模型都做两遍，而是对高后果接口和结论准备独立路线。

16.2 纯开放路线的适用范围

SALOME/FreeCAD/Paramak + Gmsh + Code_Aster/OpenFOAM/MOOSE/FEniCS + OpenMC/DAGMC + OFT/ThinCurr + FESTIM/TMAP8 + preCICE 可以形成强大的开放研发栈，适合概念设计、方法开发、教育、自动化和数字孪生服务原型。它距离核级设计生产的主要差距是复杂 CAD/装配鲁棒性、材料和接触模型资格、供应商交付、长期版本支持、用户培训、质量体系以及大规模装置验证。应把补齐这些能力作为正式产品工程，而不是假设“开源代码公开”就已解决。

16.3 不建议的选型方式

- 不按“一个平台覆盖最多物理”选型。覆盖列表不等于目标工况验证。
- 不把 GUI 操作当流程。所有关键输入、网格、载荷和后处理必须脚本化或可追溯。
- 不以论文数量代替指定装置验证，也不以商业品牌代替模型适用域。
- 不在概念阶段过早建立全细节 CAD；也不在设计定型阶段继续依赖无配置控制的参数模型。
- 不把数字孪生等同于把有限元云图放进三维可视化。

17. 从 DINA/MEQ 到 Tokamak 工程数字孪生的路线

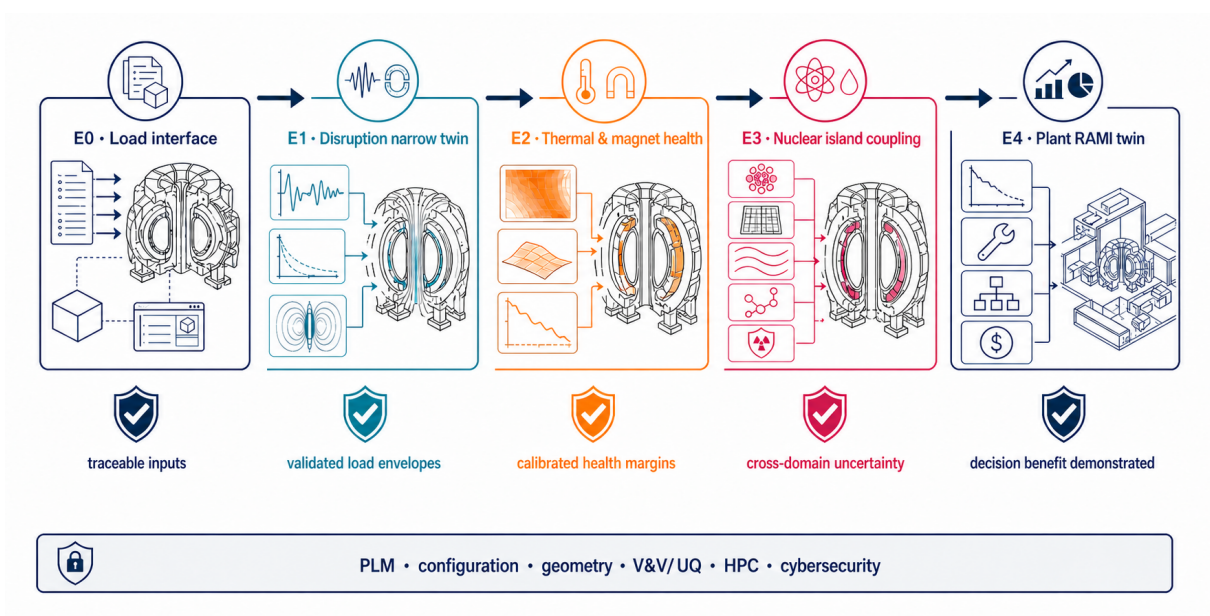


图 15 从 DINA/MEQ 载荷接口到工程和整厂 RAMI 的能力门路线。image-2 重绘，作者审校。

阶段 E0：工程数据与配置基础（0-12 个月）

建立资产分解结构、永久 ID、坐标系、单位、材料和场景命名；把 DINA/MEQ 输出定义为正式 load package；建立 CAD/分析模型登记、容器/软件版本、试验数据索引和结果证据页。选择一个真实装置的真空室/被动结构作为贯通样例。

验收门包括：同一场景可一键重放；力/力矩/能量映射守恒；所有结果可追溯到 CAD、网格、材料、求解器和审查；历史 disruption 磁测量可回放。

阶段 E1：破裂电磁—结构窄孪生（12-24 个月）

以 DINA/MEQ + CARIDDI/ThinCurr/Maxwell/COMSOL + Mechanical/Abaqus 建立多保真链：快速轴对称模型在线估计，三维薄壁/体导体离线校准，结构模型生成载荷裕量代理。接入磁探针、线圈电流、应变和位移，形成 shadow mode，不直接参与保护。

验收门包括历史事件盲回放、最坏时延、传感器故障降级、超域检测和结构载荷区间覆盖。

阶段 E2：PFC 热状态与磁体/低温健康（2-3 年）

接入 HEAT/边界模型、IR/量热、CFD/热结构和材料寿命，建立 PFC 温度与累积热循环状态；接入 4C/THEA/电路、线圈温压流量与电压，建立磁体热水利和失超裕量估计。高保真 CAE 离线生成 ROM，在线服务仅做状态估计、短期预测和异常检测。

验收门包括装置红外/冷却试验、模型线圈/运行数据验证、能量平衡、校准参数稳定性和维护后状态重置。

阶段 E3：核环境、氚与部件寿命（3-5 年）

建立配置自动派生的 MCNP/OpenMC/DAGMC 模型，离线计算核热/剂量/TBR/响应矩阵；FISPACT/R2S 根据真实脉冲历史更新活化；FESTIM/TMAP8/系统模型更新氚库存；结构寿命使用温度、应力、辐照和实际循环谱。在线只更新累计量和代理，不实时运行全蒙特卡洛。

验收门包括 FNG/JET/材料样品基准、核数据不确定度、几何转换质量、质量/氙守恒和独立核分析复核。

阶段 E4：维护、RAMI 与安全决策支持（4-6 年）

将 as-built/as-maintained 配置、机器人任务、部件健康、备件和辐射窗口连接到离散事件 RAMI；将 MELCOR/系统安全情景的离线结果形成边界和训练工具。孪生可建议检查和维护顺序，但安全保护与许可结论保持独立权威链。

验收门包括全尺寸任务试验、维修时间分布、故障恢复、权限分离、网络安全和审计。

阶段 E5：聚变堆/电厂全生命周期（5-8 年）

连接包层、热功率转换、燃料循环、厂用电、电网、库存、经济和退役；形成“在线运行环 + 离线证据工厂”。在线环使用已资格化的降阶模型和状态估计；离线工厂持续运行高保真 CAE、UQ、设计优化和回归验证，将经过证据门的新模型发布到在线环。

最终目标不是所有仿真同时运行，而是任何决策都能回答：对应哪一台资产、哪个配置和时刻；使用什么模型与数据；误差和适用域是什么；由谁批准；如果模型失效如何降级；结果如何被后续实验证伪或更新。

18. 组织、人才与近期行动清单

建议设置跨学科“工程模型办公室”，下设载荷与场景、CAD/配置、结构/热流体、电磁/磁体、核与氙、试验验证、数据/平台和安全质量负责人。每个模型同时指定物理责任人、软件责任人和应用责任人，避免代码无人维护或结论无人负责。

未来十二个月的可执行动作如下：

1. 选择一个装置、一类 disruption 和一个结构部件做端到端样板，冻结 CAD 与传感器数据。
2. 定义 load package v1，包含 DINA/MEQ 时间历程、场、坐标、UQ 和审核元数据。
3. 用一条商业链和一条开放链计算涡流/结构响应，明确差异与适用域。
4. 建立最小验证矩阵：解析/制造解、网格收敛、跨代码、一次历史事件和一次盲事件。
5. 建立工程工具目录、许可/出口/维护风险和容器化策略；禁止关键模型只存在个人工作站。
6. 把结果发布为只读影子服务，显示状态、预测区间、模型健康和证据链接，不进入保护闭环。
7. 以同一方法扩展到 PFC 热状态和磁体低温，优先选择传感器充分、可快速验证的对象。

19. 结论

Tokamak 工程仿真的真正难点不是缺少强大的通用软件，而是如何把不确定的等离子体和核载荷转换为配置正确、数值守恒、试验可验证、规范可接受的部件与系统结论。成熟路线是：PLM 管资产，专用代码描述聚变独特载荷，通用 CAE 计算工程响应，试验层次化验证，开放工具承担自动化与独立复核，模型治理确保每个结果有指定用途和回退边界。

对当前以 DINA/MEQ 为控制服务的项目，最有价值的下一步是建立破裂电磁—结构载荷窄孪生，而不是先覆盖整厂。它能迫使团队解决坐标、时间、场映射、CAD 版本、传感器响应、UQ 和证据门等共性基础；一旦这条链通过装置数据验证，同样的工程架构即可逐步复制到 PFC、磁体/低温、中子/活化、氦、维护和电厂系统。

附录 A：Tokamak 工程仿真工具比较矩阵

A.1 几何、数据与 workflow

工具/平台	开放性与技术栈	最适用范围与验证	主要缺点/孪生差距
CATIA V5/3DEXPERIENCE + ENOVIA	闭源商业；CAD/PLM/CAA/VBA/API	ITER 等超大装配、配置、接口、制造；以供应商/装配检查验证	许可与定制昂贵；CAE 派生、在线状态和物理证据需外部系统
NX + Teamcenter	闭源商业；Parasolid、PLM、Simcenter 生态	产品结构、公差、制造、CAE 数据管理；工业资格深	聚变专用载荷/核数据接口需自建；厂商锁定
AVEVA E3D / Bentley / Revit	闭源商业；厂房、管线、BIM	厂房布置、HVAC、管线、电缆和碰撞；现场测量/施工验证	不是物理求解器；与核分析/装置状态语义连接有限
SALOME	LGPL；C++/Python、OpenCASCADE、SMESH、MED	CAD 简化、网格、场映射、YACS/SALOME_Meca/CFD；核工业积累	大装配鲁棒性、PLM 权限和商业支持弱于主流平台
FreeCAD/CadQuery/OpenCASCADE	开源；C++/Python	参数化部件、自动几何、概念模型；与 CAD 体积/尺寸比较	复杂装配、配置、制造和核质量流程不足
Paramak / bluemira	开源；Python/CadQuery/OpenCASCADE	Tokamak 参数化 CAD、概念设计、中子学几何快速迭代	不等于制造 CAD；细节和 as-built 配置不足
HyperMesh/ANSA/SpaceClaim/Cubit	闭源商业为主；网格与几何修复	大型 FE/CFD/蒙卡前处理；网格质量和求解器导出成熟	特征删除可能破坏电流、流束和结构路径；需审计规则
Gmsh	GPL；C++/Python API	自动四面体/高阶网格和研究 workflow；可用解析/基准检查	复杂工业装配修复和团队配置管理有限
ParaView/VTK	BSD；C++/Python	大规模场可视化、采样、比较和自动报告	不管理资产语义、证据和权限
preCICE / FMI / SSP	开源或标准；C++/Python、多求解器	分区耦合、ROM/系统模型交换；以守恒和耦合基准验证	只解决通信/协同，不保证各物理模型正确或稳定

A.2 破裂、电磁、结构与磁体

工具/平台	开放性与技术栈	最适用范围与验证	主要缺点/孪生差距
DINA / MEQ	机构/合作获取; Fortran/C/C++ 为主	轴对称等离子体—线圈—被动结构动态、控制场景; 装置回放	三维导体、端口、局部 halo 和结构寿命不足
TokaMaker	开源 OFT; Fortran/C++/Python	时变自由边界平衡和电路; 解析/跨代码/装置算例	新兴; 正式资格、复杂 CAD 和工业支持需建设
ThinCurr	开源 OFT; 高阶 FEM/Python	三维薄壁涡流、RWM、被动导体; SPARC/DIII-D 与基准	薄壁假设; 厚度电流、连接和局部细节有限
CARIDDI	受限/合作; 积分方程、边元	三维体导体、传感器、电压、MHD 耦合; ITER/JOEKE/MARS-F	获取和前后处理门槛; 版本/接口依赖专家
STARWALL	研究代码; 薄壁表面电流	JOEKE/VMEC/CAS3D 壁耦合、VDE/RWM; 跨代码基准	体导体、接触、局部力和工业结构接口有限
VALEN	研究/受限; Fortran、薄壳 FEM/电路	RWM、控制线圈/传感器和三维壁; DIII-D/MAST-U/FIRE	现代接口、开放维护和一般工程集成有限
Keddy3D / PECAN	研究代码; 薄壁/两阶段 workflow	非轴对称涡流和紧凑 Tokamak disruption 载荷	公开质量体系与跨装置证据有限
Ansys Maxwell/APDL/Mechanical	闭源商业; FEM、APDL/Python	线圈、涡流、磁—结构、接触、动力学; ITER/JT-60SA 等	许可、高成本、大模型; Tokamak 场景和 halo 需自建
COMSOL	闭源商业; 统一 FEM、自定义 PDE	局部磁—热—结构—流体、反演; EAST/磁体/PFC	大装配和核级证据较弱; 求解器/版本黑箱部分存在
Opera/TOSCA / Simcenter MAGNET	闭源商业; 低频电磁	磁体、线圈、铁磁和涡流; 工业磁测量验证	Tokamak 专用等离子体/halo 接口不足
Abaqus/Simcenter 3D/Code_Aster	商业/开源混合; FEM	非线性结构、接触、疲劳、断裂、热机械; 试验关联	载荷正确性和辐照本构不由求解器保证
4C	研究/合作; 多尺度热工水力 /Modelica/FE	CICC、线圈结构和低温回路; HELIOS/ITER/EAST 验证	专家和配置门槛; 实时部署需 ROM 与状态估计
THEA/Gandalf/Mithrandir	CryoSoft 商业/受限; 1D 热—水力—电	CICC 稳定性与失超; QUELL/SULTAN/导体试验	老旧接口、许可和整机耦合; 参数高度依赖试验
JackPot-ACDC	研究/合作; 绞线网络	CICC 股线电流、耦合损耗; 与 THEA 联合	计算与输入成本高, 不适合整机在线
ROXIE/QuenchPro/STEAM/FiQuS	开放性各异; 磁场/电路/热	磁体场和失超交叉验证; 加速器磁体经验	需对 Tokamak CICC/HTS 和循环场景重新验证

A.3 热流体、PFC、包层和氚

工具/平台	开放性与技术栈	最适用范围与验证	主要缺点/孪生差距
HEAT	开源; Python + CAD/FVM/FEM/MHD 接口	PFC 三维热流和温度; SPARC 设计、DIII-D IR 验证	依赖外部边界物理与材料寿命; 在线需加速/校准
MEMENTO	开源研究; C++/AMReX	钨等金属熔化与熔层运动; EUROfusion/JET 验证	适用异常熔融, 不代替常规疲劳/结构评定
Ansys CFX/Fluent	闭源商业; FVM、UDF	冷却、共轭热、多相、包层和 PFC; 大量 mock-up/回路应用	特殊 CHF、MHD、氦/PbLi 相关式需专门验证
STAR-CCM+	闭源商业; FVM/自动网格/Java API	复杂 CFD、多相、CHT、设计探索、GPU	核热/氦/聚变材料接口和核资格需项目建设
OpenFOAM	GPL; C++/FVM	自定义 CFD、CHT、MHD、HPC; 解析/实验基准	分支碎片化、模型质量责任和工业前处理成本高
Code_Saturne/SYRTHES	GPL; C/Fortran、SALOME	核/工业 CFD、热耦合; EDF 验证体系	聚变专用模型和国际用户生态小于 OpenFOAM/商业工具
NekRS	开源; 谱元、GPU/MPI	高保真湍流、Cardinal 内存耦合	工程几何/边界和系统级速度不足, 需闭合/降阶
GETTHEM	研究代码; 1D 系统热工	EU DEMO 包层/PHTS 快速瞬态与参数扫描	三维热点、MHD 和材料细节需 CFD/FE 补充
RELAPS/TRACE/CATHARE/ATHENA	许可/机构; 1D 两相系统代码	冷却回路和事故边界; 核工业基准与 WCLL 研究	原始关联式不一定覆盖氦、PbLi、FLiBe/聚变几何
HIMAG/MHD-UCAS	研究/受限; 液态金属 MHD	DCLL/PbLi 高 Hartmann 流; 回路/跨代码验证	获取、文档和全包层耦合有限
FreeMHD	开源; OpenFOAM/C++	多域、多相、自由表面导电; 公开 V&V	新兴; 极高 Ha、腐蚀和工程 CAD 仍需验证
FESTIM	Apache-2.0; Python/FEniCSx	1D-3D 氢/氚扩散、陷阱、热耦合; TDS/渗透/包层	材料/表面参数不确定; 系统管网和在线库存需外部模型
TMAP8	开源; MOOSE/C++	系统质量/热/氚迁移、UQ/SQA; TMAP V&V 与实验	正在成长; 复杂表面和完整燃料循环验证不完备
TESSIM-X/MHIMS/mHIT	研究/受限; 扩散—陷阱	欧洲包层/PFC 氚、跨代码和实验比较	开放性、维护和多物理接口不一致
Cardinal/SALAMANDER	开源; MOOSE + OpenMC + NekRS + TMAP8	核热—CFD—固体—氚高保真耦合; HCLL/教程	目前更多是研发/演示, 完整工程资格和材料库不足

A.4 中子、安全、真空、维护与生命周期

工具/平台	开放性与技术栈	最适用范围与验证	主要缺点/孪生差距
MCNP6	受控许可; Fortran/C++	融合固定源、屏蔽、核热、诊断; ITER/JET/FNG 深证据	出口/许可、CSG 维护、自动化与开放性受限
TRIPOLI-4	CEA 许可; 连续能量 MC	ITER/DEMO 独立参考、D1S/R2S; 与 MCNP/实验比较	获取和生态受限
OpenMC	MIT 开源; C++/Python/HDF5	参数化中子/光子、CAD/DAGMC、R2S; FNG/SPARC	深穿透/部分融合功能和正式认可仍在积累
Serpent 2	学术免费/商业许可; C	快速连续能量、耦合和停机剂量交叉验证	许可边界; 聚变工程积累少于 MCNP
PHITS/FLUKA/Geant4	许可/开源混合; 粒子输运	高能次级粒子、探测器、辐射防护	TBR/核热/活化需 FENDL 和专项基准
SuperMC/cosRMC	机构/部分发布; CAD/蒙卡	中国聚变工程、CFETR、R2S 与 ITER 基准	国际开放性、版本和独立复核有限
DAGMC/McCad	开源/机构; MOAB/CAD 转换	工程 CAD 到蒙卡、复杂端口和自动派生	几何 watertight、公差、材料和性能需严检
FISPACT-II/ALARA	许可/开源混合; 库存/活化	活化、衰变热、dpa、气体、废物、R2S	结果依赖谱、核数据和辐照历史; 不做空间输运
MELCOR Fusion	受控许可; 系统事故/气溶胶	ITER/DEMO/DTT 事故、安全和释放	融合模型/版本迁移、保守性和实验数据有限
Molflow+ / AVOCADO	GPL/研究; 试验粒子蒙卡	超高真空压力、泵速、NBI 气体; 电导/压力试验	自由分子假设; 表面历史、等离子体化学与事故需补充
EcosimPro/Modelica/AME Sim	商业/开放混合; DAE/网络	低温、热力、真空、燃料和控制系统瞬态	组件参数/关联式与融合验证决定可信度
Simulink/Simscape/PSCAD/PLECS	商业; 控制/电力电子/HIL	线圈电源、保护、厂用电与硬件在环	不是结构/核物理; 模型版本和代码生成需严格治理
DELMIA/Tecnomatix/Process Simulate	闭源商业; 机器人/工艺/PLM	ITER 装配、远程维护、4D 工艺; 全尺寸/机器人验证	运动/碰撞不等于真实柔性、接触和辐射环境
ROS 2/Movelt/Gazebo/CoppeliaSim	开源/混合; C++/Python	研究型遥操作、规划、数字样机和 HIL	核级可用性、确定性、供应商支持和长期资格不足
BlockSim/Isograph/MAROS/SimPy	商业/开源混合; RAMI/离散事件	可靠性框图、故障树、维护物流和可用率	融合失效数据稀缺; 结论可能被专家先验主导

附录 B：验证与采购检查表

对任一候选工具，应在采购或合作前回答以下问题：源代码和算法能否审计；许可是否允许商业、跨境和 HPC 使用；版本支持周期多长；是否能无 GUI 批处理；输入输出是否开放；是否有 Python/C++/Fortran API；是否支持容器和作业调度；是否有回归测试、QA 或核质量材料；是否有解析、制造解、跨代码和实验验证；验证工况是否覆盖目标温度、磁场、雷诺/Hartmann 数、辐照和几何；材料数据库来源是什么；能否传播参数和模型不确定度；是否支持永久资产 ID、单位、坐标和元数据；结果能否独立复核；供应商停止服务时能否重现历史结论。

附录 C：参考来源

- [E1] ITER Organization, "One-stop shop: Engineering Database launched."
<https://www.iter.org/node/20687/one-stop-shop-engineering-database-launched>
- [E2] ITER Organization, "Seeing ITER at millimetre-level resolution."
<https://www.iter.org/node/20687/seeing-iter-millimetre-level-resolution>
- [E3] ITER Organization, "On-the-fly data transfer / global design office."
<https://www.iter.org/node/20687/fly-data-transfer>
- [E4] ASME, V&V 10 - Standard for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics.
<https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/standard-for-verification-and-validation-in-computational-solid-mechanics>
- [E5] ASME, Digital Engineering and VVUQ standards overview.
<https://www.asme.org/codes-standards/about-standards/technology-highlights/digital-engineering>
- [E6] NAFEMS, Guidelines for Validation of Engineering Simulations.
https://www.nafems.org/publications/resource_center/r0134/
- [E7] SALOME Platform, official features and documentation. <https://www.salome-platform.org/>
- [E8] Paramak and bluemira documentation. <https://paramak.readthedocs.io/> ;
<https://bluemira.readthedocs.io/>
- [E9] Gmsh official documentation. <https://gmsh.info/>
- [E10] JT-60SA divertor electromagnetic modelling with Ansys Maxwell/Workbench.
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2022.113400>
- [E11] Albanese/Rubinacci CARIDDI lineage and ITER magnet voltages.
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2023.113500>
- [E12] JOEREK-CARIDDI RMP screening. <https://arxiv.org/abs/2403.03226>
- [E13] JOEREK-STARWALL nonlinear MHD/wall coupling. <https://arxiv.org/abs/1408.6379>
- [E14] Open FUSION Toolkit official documentation. <https://openfusiontoolkit.github.io/OpenFUSIONToolkit/>
- [E15] ThinCurr for SPARC and DIII-D conducting structures. <https://arxiv.org/abs/2309.15336>
- [E16] VALEN 3D wall/control modelling, IAEA contribution.
https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/csp_019c/pdf/thp3_13.pdf
- [E17] Keddy3D thin-wall eddy-current code. https://www.jspf.or.jp/PFR/PFR_articles/pfr2022/pfr2022_17-1403104.html
- [E18] Ansys Magneto-Structural Analysis documentation.
https://ansyshelp.ansys.com/public/Views/Secured/corp/v252/en/ans_cou/Hlp_G_COU3_magstr.html
- [E19] Ansys System Coupling documentation. https://ansyshelp.ansys.com/public/Views/Secured/corp/v252/en/ai_sinfo/sc_intro.html
- [E20] EAST outer divertor disruption loads reconstructed from measured discharges with COMSOL.
<https://www.ans.org/pubs/journals/fst/article-37570/>
- [E21] KSTAR eddy-current vertical forces. [https://doi.org/10.1016/S0920-3796\(03\)00052-8](https://doi.org/10.1016/S0920-3796(03)00052-8)

- [E22] 4C code for ITER cryogenic circuit, conductor and coil. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2009.05.012>
- [E23] 4C qualification and validation review, IAEA FEC 2025.
https://conferences.iaea.org/event/392/papers/36422/files/13780-FEC2025_Paper_4C_v3_final.pdf
- [E24] CryoSoft THEA official description. <https://supermagnet.sourceforge.io/thea.html>
- [E25] QUELL experiment validation of Gandalf. [https://doi.org/10.1016/S0011-2275\(98\)00014-9](https://doi.org/10.1016/S0011-2275(98)00014-9)
- [E26] JackPot-ACDC + THEA ITER conductor stability. https://ris.utwente.nl/ws/portalfiles/portal/59262637/Jackpot_THEA_CS_stability_ver8.2.pdf
- [E27] SPARC Toroidal Field Model Coil Program. <https://arxiv.org/abs/2308.12301>
- [E28] JT-60SA global structural/electromagnetic FE model. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2011.02.059>
- [E29] HEAT official documentation. <https://heat-flux-engineering-analysis-toolkit-heat.readthedocs.io/>
- [E30] ORNL, HEAT development and DIII-D infrared validation.
<https://www.ornl.gov/publication/development-and-validation-non-axisymmetric-heat-flux-simulations-3d-fields-using-heat>
- [E31] PPPL, Integrated physics-engineering workflows for SPARC.
<https://www.pppl.gov/events/2023/pppl-colloquium-integrated-physics-engineering-simulation-workflows-sp-arc-tokamak>
- [E32] MEMENTO code for macroscopic melt motion. <https://arxiv.org/abs/2404.12904>
- [E33] ITER tungsten monoblock thermo-mechanics under HHF.
https://nucleus.iaea.org/sites/fusionportal/Technical%20Meeting%20Proceedings/3rd%20Joint%20IAEA-ITER%20TM/Website/abstracts/O1_Panayotis_S.pdf
- [E34] CFETR HCCB manifold optimization with CFX. <https://doi.org/10.1080/00223131.2018.1461693>
- [E35] EAST PFC baking thermal modelling and calorimetry verification.
<https://researchers.mq.edu.au/en/publications/an-analysis-method-and-primary-calorimetry-verification-of-tokamak/>
- [E36] OpenFOAM official documentation. <https://www.openfoam.com/documentation/>
- [E37] Code_Saturne official EDF page. <https://www.edf.fr/en/the-edf-group/inventing-the-future-of-energy/research-and-global-expertise/our-offers/codesaturne>
- [E38] Cardinal official documentation. <https://cardinal.cels.anl.gov/>
- [E39] Development of ITER Structural Design Criteria for In-vessel Components.
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2013.01.019>
- [E40] ITER Organization, "Trial by fire" - divertor HHF qualification. <https://www.iter.org/node/20687/trial-fire>
- [E41] Comparison of FEM and HHF testing for ITER-like PFCs. <https://iris.enea.it/handle/20.500.12079/5871>
- [E42] Testing of HHF components manufactured for ITER divertor.
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2008.10.012>
- [E43] Advanced neutronics simulation tools for DEMO/ITER.
<https://nucleus.iaea.org/sites/fusionportal/Shared%20Documents/FEC%202016/fec2016-preprints/preprint0517.pdf>

- [E44] ITER integrated neutronics models and code comparison.
https://www.iter.org/sites/default/files/media/2025-07/l-15_khodak.pdf
- [E45] OpenMC official documentation. <https://docs.openmc.org/en/latest/>
- [E46] OpenMC CAD/DAGMC geometry guide. <https://docs.openmc.org/en/latest/usersguide/geometry.html>
- [E47] Cardinal DAGMC Tokamak tutorial. <https://cardinal.cels.anl.gov/tutorials/tokamak.html>
- [E48] OpenMC model of SPARC for diagnostic scoping. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2025.115676>
- [E49] cosRMC unstructured mesh tally and ITER shutdown dose benchmark.
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2022.113211>
- [E50] PyNE sub-voxel R2S and CFETR application. <https://doi.org/10.1088/2058-6272/ac6be3>
- [E51] IAEA, FENDL library. <https://www-nds.iaea.org/fendl/>
- [E52] IAEA FENDL benchmark library. <https://www-nds.iaea.org/fendl20/fen-bench.htm>
- [E53] UKAEA FISPACT-II official service and capabilities. <https://www.ukaea.org/service/fispact/>
- [E54] OpenMC fully open-source R2S validation with FNG. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ad32dd>
- [E55] JET DTE2 shutdown dose experiment. <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-024-05208-w>
- [E56] UKAEA, MCR2S benchmarking with MCNP, Serpent 2 and OpenMC.
<https://scientific-publications.ukaea.uk/papers/shutdown-dose-rate-benchmarking-using-modern-particle-transport-codes/>
- [E57] ITER neutronics lessons from JET D-T operation, IAEA FEC 2025.
https://conferences.iaea.org/event/392/contributions/35802/attachments/19803/36325/Villari_TEC_2937_FEC2025.pdf
- [E58] GETTHEM WCLL system thermal-hydraulic analysis. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.05.203>
- [E59] RELAP5 system analysis for WCLL blanket. <https://conferences.iaea.org/event/406/contributions/37051/>
- [E60] CFETR integrated design platform neutronics-thermal-hydraulics coupling.
<https://html.rhhz.net/hejishu/html/2018/1/2018010601.htm>
- [E61] Liquid-metal fusion blanket modelling review. <https://www.osti.gov/biblio/1906620>
- [E62] FreeMHD V&V. <https://arxiv.org/abs/2409.08950>
- [E63] Fusion liquid-metal blanket MHD pressure-drop review. <https://doi.org/10.3390/fluids6030110>
- [E64] FESTIM official documentation. <https://festim.readthedocs.io/>
- [E65] FESTIM V&V report. <https://festim-vv-report.readthedocs.io/>
- [E66] TMAP8 official documentation. <https://mooseframework.inl.gov/TMAP8/>
- [E67] TMAP8 open-source tritium transport and V&V paper. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2025.114874>
- [E68] European tritium transport tools review. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2024.114665>
- [E69] mHIT fusion-relevant V&V. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/adab85>
- [E70] SALAMANDER official documentation. <https://salamander.inl.gov/>
- [E71] MOOSE tracked applications and fusion stack. https://mooseframework.inl.gov/application_usage/tracked_apps.html

- [E72] Cardinal OpenMC-MOOSE coupling tutorials. https://cardinal.cels.anl.gov/tutorials/openmc_solid.html
- [E73] CERN Molflow+ official documentation. <https://molflow.docs.cern.ch/about/>
- [E74] AVOCADO gas-density simulation for ITER NBI/SPIDER. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2015.07.009>
- [E75] Sandia MELCOR official site. <https://www.sandia.gov/MELCOR/>
- [E76] International benchmarking of MELCOR and ATHENA-INTRA for fusion safety. [https://doi.org/10.1016/S0920-3796\(02\)00249-1](https://doi.org/10.1016/S0920-3796(02)00249-1)
- [E77] Current status of MELCOR 2.2 for fusion safety. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2023.113869>
- [E78] INL Fusion Safety Codes. <https://inl.gov/fusion-safety/fusion-safety-codes/>
- [E79] Dassault Systèmes, ITER PLM/DELMIA case. <https://www.3ds.com/insights/customer-stories/iter>
- [E80] Fusion for Energy, VR for ITER remote maintenance. <https://fusionforenergy.europa.eu/news/virtual-reality-guides-engineers-to-perform-iter-maintenance-works/>
- [E81] VTT, simulation-based design verification of ITER remote handling. <https://cris.vtt.fi/en/publications/simulation-based-design-process-for-the-verification-of-iter-remo/>
- [E82] EUROfusion, JET remote maintenance system. <https://scipub.euro-fusion.org/archives/jet-archive/design-and-operation-of-the-remote-maintenance-system-in-jet>
- [E83] JET VR system for EP2 remote handling. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2011.03.063>
- [E84] DTT hyper-redundant remote manipulator virtual simulation. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2023.113552>
- [E85] ITER Trial, Test and Training Facility. <https://www.iter.org/actualites-iter/practice-makes-precision>
- [E86] IAEA TECDOC-1851, structural design criteria for fusion reactors. <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE1851web.pdf>
- [E87] 4C validation with EAST TF magnet cooldown. <https://indico.cern.ch/event/1592716/contributions/6845194/>

资料截止日期：2026 年 8 月 9 日。软件版本、许可、出口和商业条款会变化；正式采购、设计或安全使用前，应向代码所有者和项目质量部门核实最新状态。本报告对闭源工具只陈述公开证据，对未公开机构代码不推断内部能力。