法国 900 MWe 核电机组 VD4 浅析

法国 900 MWe 机组的第四次十年大修（VD4）以及配套的第四次定期安全审查（RP4）已进入改造实施与运行经验反馈同步开展阶段。其中 RP4 的文件编制、安全论证和相关监管决议跨多年推进，机组的大修和升级改造工作一部分在 VD4 窗口期内落地，其余部分则安排在后续换料大修中分批实施。

法国核与辐射安全局（ASNR）《2025 年核安全与辐射防护状况报告》显示，截至 2025 年底，32 台 900 MWe 机组中有 25 台已完成或启动 VD4，所实施的一系列改造升级工作旨在：1）降低堆芯熔化事故的概率，并减轻无堆芯熔化事故的放射性后果；2）预防和缓解严重事故；3）丧失乏燃料池正常冷却手段时，具备多样化的闭式冷却能力；4）提升设施对极端地震、热浪和雷击等外部灾害的耐受能力。

法国核电机组情况

法国共有 57 台在运机组，其中包含 32 台 900 MWe 机组（上世纪 70 至 80 年代间陆续投运）、20 台 1300 MWe 机组、4 台 1450 MWe 机组以及 1 台 1650 MWe 的 EPR 机组。当前开展实施 VD4 的主力堆型，正是这 32 台采用三环路设计、单层安全壳的 900 MWe 机组，该批机组主要型号如下:

- CP0（4 台：比热 2 号至 5 号机组）：属于早期设计，非标准化机型。系统配置和厂房布置与后续批次存在差异。比热核电厂受通用审查框架约束，但其 VD4 安全论证和改造方案另有专项技术审查。

- CPY（含 18 台 CP1 型和 10 台 CP2 型）：属于标准化机组系列。CP1 包括布莱耶、当皮埃尔、格拉夫林和特里卡斯坦；CP2 包括希农 B、克吕阿和圣洛朗 B。该系列机组能够共享安全论证与改造经验，但还需逐台厂址核查水文、地震、土建和相关设备的实际状态。

法国核电机组定期安全审查情况

法国核设施的创建许可由政府以法令形式颁发，原则上不预设固定运行期限，但这不意味着取得许可后即可永久运行。《环境法典》要求营运单位每十年开展一次周期性安全审查，而十年大修是实施检查、试验和部分改造的关键节点。法国通过历次十年期安全审查持续提高机组安全水平。其中第四次定期安全审查（VD4）与以往不同，是评价机组在运行约 40 年，部分设备达到设计时采用的 40 年寿命假设之际，对机组安全水平开展的重要审查工作，也是判断机组后续能否继续运行的关键，并为后续更长周期的安全运行奠定基础。RP4 既要确认机组符合现行要求、掌握设备老化情况和实际缺陷，也要参照新一代反应堆的安全目标重新评价并实施改进。

在第三次定期安全审查（RP3）以及福岛事故后，法国

核安全监管机构不再只确认机组是否符合原始设计和既有规范，还要结合当前技术发展与安全目标，评估机组还需做哪些改进，以接近新一代反应堆的安全目标。以 EPR 型反应堆为例，其强调防止可能造成大规模早期释放的堆芯熔化事故，并限制无法排除的堆芯熔化事故后果，但按照 1970 年代标准设计的机组，与新一代反应堆的标准差距是系统性的，不是小修小补可以弥合。因此，2011 年以后，法国 900 MWe 机组开始分阶段落实福岛事故后新增改进措施及后续改造计划，相关工作一直延续到 VD4。

法国采用通用审查与专项审查相结合的方式。首先将 32 台 900 MWe 机组作为同一系列开展通用审查，再逐台纳入厂址和机组差异。由于该批次机组投运时间跨度大，各机组 VD4 实施排期相差十余年。例如熔融物稳定装置在首台实施 VD4 的机组投运时间为 2021 年 11 月，最晚则计划为 2036 年。

法国 900 MWe 机组各厂址 VD4 审查重点

厂址	型号	机组	厂址特征与 VD4 审查重点
布莱耶（Blayais）	CP1	1—4	位于吉伦特河口，1999 年的风暴和洪水推动厂址防洪复核与升级，是法国厂址洪水复核与防护升级的标杆厂址
比热（Bugey）	CP0	2—5	位于罗讷河谷，为 900 MWe 中最老机型、与其他机型差异最大，在 VD4 中单列一类，

厂址	型号	机组	厂址特征与 VD4 审查重点
			需要专项安全论证和改造文件。其堆坑隔水、终极电源改造等为重点
希农 B（Chinon B）	CP2	B1—B4	位于卢瓦尔河，B2 已于 2026 年 7 月启动 VD4，B4 机组因 VD3 时间晚，预计 2036 年启动 VD4，为全法最晚
克吕阿（Cruas）	CP2	1—4	位于罗讷河，抗震支墩及底板间夹层影响熔融物稳定与事故注水、泄压次序，需使用专门的厂址规程
当皮埃尔（Dampierre）	CP1	1—4	位于卢瓦尔河，是法国核应急快速反应部队的驻地之一。实施底板加厚，水源和改造接口等需按机组验证
格拉夫林（Gravelines）	CP1	1—6	6 台滨海机组（全法最大厂址），海滨盐雾环境、终极水源改造、多机组叠加事故下的应急协同是监管关注重点
圣洛朗 B（St.Laurent）	CP2	B1—B2	位于卢瓦尔河，1 号机组曾于 1987 年首次装载 MOX 燃料，其在 VD3 期间加装了注水加热装置，以降低压力容器事故热冲击，需结合制造缺陷开展容器专项论证
特里卡斯坦（Tricastin）	CP1	1—4	位于罗讷河谷，VD4 首堆厂址（1 号机组，2019）。2010 年记载其压力容器有 20 处

厂址	型号	机组	厂址特征与 VD4 审查重点
			堆焊层下制造缺陷，最大缺陷约 11 毫米，需持续开展在役监测和断裂力学论证

VD4包含大量工作，既要检查老化、验证设备状态，也要落实福岛事故后提出的安全改进要求。其中，安全意义最突出、优先级最高的**硬核（Noyau Dur）**改造具备明确的事故场景与功能定位，主要指一套可在极端外部灾害叠加常规电源、冷源丧失的工况下持续执行安全功能的设备体系与配套组织安排，其目标为:

- 预防燃料熔化事故或限制事故进展;

- 限制大规模释放;

- 使营运单位能够持续履行应急管理职责。

此外，老化评估、探伤、水压试验、安全壳密封性试验等是机组继续运行的必要论证工作，是否纳入硬核，还需看其适用场景和是否承担安全兜底功能等，既有设备经验证、补强后也可能纳入硬核。

VD4 硬核改造相关情况

1.终极应急柴油发电机组（DUS）

DUS 为机组增加一路能抵御极端外部灾害的备用电源，为硬核所需的泵、阀门、控制和监测设备供电。它的作用不

仅取决于柴油机本身，还取决于厂房防护、辅助设备、燃油、配电和切换回路的可用性。通过增加隔离和独立性以降低共因失效风险，最大限度保障设计基准全厂断电工况下堆芯冷却。

案例

- **比热：**法国电力公司（EDF）在 2025 年公布的讨论文件中，将既有机组 DUS 列作已经实施的改造。DUS 设于可抵御极端地震的钢筋混凝土厂房内，抬高布置以防洪，屋顶骨架按抵御极端风所携飞射物设计。这些厂房防护措施与独立备用电源共同构成保障链条。ASNR 专项审查了该厂址涉及 DUS 与既有低压配电、切换设备及原应急汽轮发电机功能的衔接，并要求对切换设备开展带负荷试验，以验证发热和电气保护配合。这比单独确认柴油机能够启动，更能检验完整供电链条。

- **圣洛朗：**ASN 于 2019 年 2 月 27 日通报，该厂址两台 DUS 已投入运行，可作为后福岛硬核电源部署的早期实例。长期运行还需维持燃油、通风冷却及配电辅助设备的可用性。

2. 极端外部灾害防护构筑物

硬核设施所在厂房、廊道和供电供水路径等，应按硬核规定的极端灾害水平验证和防护，涉及地震、洪水、强降雨及相关气象事件。地震防护应区分原有 SMS 设计基准与硬核地震水平，气象防护还需考虑极端风、龙卷风及其飞射物效

应，各类洪水情景也应分别确定危险源水平并验证防护能力。

案例

- 布莱耶：ASNR 在 2026 年 3 月的个别审查中指出，该厂址同时受河口河流与海洋双重水文因素影响，既有外洪防护构筑物已加强或仍需加强、抬高，以保护硬核设备免受超过原设计水平的洪水影响。该意见还要求继续完善特殊地质场地效应的论证，表明土建防护和危险源评价需配套推进。

- 特里卡斯坦：EDF 在 2026 年公开的 4 号机组审查资料中，列出针对硬核龙卷风直接荷载和飞射物的防护措施，包括在暴露管段、电缆路径、PTR 水箱和燃料厂房等薄弱部位设置加强格栅、钢网或钢结构。

– 比热：2026 年 1 月的专项审查仍跟踪大型流域洪水、蓄水构筑物破坏、地下水位上升和局地降雨等情景。其中部分研究已提交。

3. 主控室及关键设备间通风冷却与可居留性

事故下的通风和冷却既关系到人员能否持续操作，也关系到电气设备、柴油机等能否保持功能。相关安全论证应覆盖事故热负荷、失去常规支持系统、人员通行和现场操作条件；不能仅凭设备平时运行正常，便认定其在事故环境中仍然可用。

案例

- **屋顶制冷方案：**EDF 于 2024 年发布的硬核制冷机组安装招标公告，明确要求在电气厂房屋顶设置满足硬核条件的风冷冷冻水机组，在原有冷却回路失效，并且无论是否叠加全厂断电的工况下，接替原有制冷设施工作。风冷冷凝方式降低了机组对原有冷却供水链路的依赖。

- **比热：**EDF 于 2024 年明确了该批次机组的改造方案，利用原厂主控室既有制冷机组，改造后接入主控室冷却回路。ASNR 在 VD4 改造方案审查中指出，柴油机电气间的空调一旦失效，在事故热负荷作用下，设备可用能力会受到室外气温限制，并建议在规定运行状态下，室外温度高于 25 摄氏度时，判定对应柴油机不可投入使用。

- **机组通用要求：**除设备热工条件外，营运单位还需验证人员穿戴防护装备时能否及时到达现场、接近操作部件并完成任务。相关改进措施不仅涉及增设空调，还需考虑通风冷却、通道和操作空间等条件。

4. 终极后备水源及堆芯和乏燃料池冷却

终极水源在常规取水或供水手段丧失时，提供额外补水能力；不同厂址可采用水井、水池或水箱。水源、泵、供电、管线和接入点必须形成可用系统，“有水”不直接等同于“能够完成长期冷却”。ASNR 于 2026 年 2 月说明，最后一批终极水源仍在部署，相关机组此前配有临时手段。

此外，冷却路径也需区分：蒸汽发生器应急给水（ASG）

用于经二回路导出堆芯余热；一回路含硼水注入有助于冷却和维持次临界；乏燃料池除补水外，还需在正常冷却丧失后恢复多样化闭式冷却。其固定管线、移动换热设备和法国核应急快速反应部队的接入安排等共同构成完整功能，不以“严重事故喷淋水源”笼统概括。



案例

- **圣洛朗：**在圣洛朗厂址增设终极冷却水源，官方文件明确其取水方式为地下水井取水。

- **比热**：EDF 于 2025 年发布的相关资料显示取水井、阀门站等相关子系统与输水管路共同构成事故补水能力。5 号机组在逐堆复审中确认，乏燃料水池多样化冷却与终极补水改造已经落地，相关工作满足安全要求。

- **特里卡斯坦 1 号机组**：EDF 于 2024 年发布的报告，将该机组 2023 年停堆期间的硬核蒸汽发生器应急给水改造列为典型案例，通过增设硬核蒸汽发生器应急给水通道，落实分阶段改造补齐二回路排热能力的相关要求。

- **希农**：EDF 于 2026 年 7 月发布的检修方案中，将 2 号机组燃料厂房水池移动式事故备用冷却系统纳入计划实施项目。

- **终极水源建设**：EDF 于 2022 年发布的报告显示，部分机组地下水井出水流量不及设计预期，对终极水源落地造成制约。

5. 安全壳氢气控制

严重事故中，锆水反应及熔融物与混凝土相互作用可能产生氢等可燃气体。被动式氢气复合器（PAR）通过催化反应降低氢浓度，不依赖外部电源。其有效性仍须结合气体产生、混合分布和局部燃烧风险评价。部分厂址此前已完成消氢改造。

案例

– VD4 补强内容：通用审查另涉及蓄电池间氢气积聚和爆炸风险，包括通风、检测和部分房间增加 PAR。这是特定设备间的防爆措施，与安全壳内的严重事故氢气管理不同。

6. 安全壳终极余热导出系统（EAS-u）

该系统可在严重事故工况下为安全壳提供长期排热能力，降低对安全壳排气过滤系统的依赖；在比热核电厂的配置方案中，它同时承担一回路含硼水补给等功能。整套系统由固定泵、换热器以及配套阀门、配电设施构成，并与终极冷源、核应急快速反应部队的移动式设备对接。系统可用与否取决于完整功能链路，不能简单理解为在原有事故喷淋回路上增设一级中间换热器。



案例

- **比热**：监管机构的专项审查记录显示，安全壳终极余热导出系统的固定设施包含泵、换热器以及接入原有安全注入与安全喷淋回路的管线，可配合场外调入的移动式冷源设备使用。该厂还专门扩建燃料厂房附属空间用于布置该系统换热器，并配套设置通风设施。5 号机组在 2023 年的复审中确认，硬核安全壳系统与硬核乏燃料相关改造，已满足在不启用排气过滤系统的前提下导出安全壳余热的安全要求。3、4 号机组还出现相关供电隐患，并被监管机构在 2022 年和 2026 年通报为 INES 1 级事件。这说明停堆检修之后的线路复接、状态核验以及运行规程落实，和硬件改造本身同等关键。

- **CPY 机型的后续补强**：ASNR 于 2025 年 4 月审评的改造方案，设置了安全壳终极余热导出系统失效后的移动式原水补给、泄漏收集回注以及污染水处理接口。相关专家评估认为该方案不会带来安全水平下降。

7. 安全壳承压与密封性

安全壳的承压、密封和严重事故排热须联合论证，并通过在役检查、整体泄漏试验和贯穿件试验维持其性能。严重事故压力分析中的限值与整体密封试验压力有不同含义，应分别说明其分析条件和适用范围。

案例

- **比热**：相关资料显示，2024 年 5 月，3 号机组实施的安全壳试验未发现异常，显示该构筑物总体表现良好。

- **其他厂址**：监管机构于 2024 年指出，熔融物经历长时间干式混凝土侵蚀后再淹水，可能使安全壳迅速升压，超过 6 bar 绝压。专家因此要求补充研究并向应急团队提供相应决策依据。

8. 堆坑熔融物冷却与滞留设施改造

该改造旨在压力容器失效后，限制熔融物侵蚀安全壳底板，避免形成向环境释放的通道。2021 年通用策略为：先维持堆坑干燥，使熔融物在堆坑底部及相邻堆内仪表间铺展，再以被动方式淹水冷却，并由后续排热系统维持冷却能力。这一方案与 EPR 专门设计的堆芯捕集器存在结构和实现方式差异。干式铺展、隔水密封、重力淹水和长期排热必须相互配合。“需要先保持干燥”与“随后水冷”的关键在于进水的时机、位置和流量。底板材料和厚度、熔融物—混凝土相互作用模型的不确定性，以及失去长期排热后的应对，都是审查重点。

案例

- **比热：** 2022 至 2023 年停堆检查发现，堆坑隔水装置内部环的硅胶密封明显劣化。EDF 提出以耐高温石墨编织密封替代，并利用下方滴漏收集槽及上方构件的遮挡作用。

- **高硅混凝土底板：**EDF 原选择对布莱耶、当皮埃尔厂址进行底板加厚。监管机构在 2024 年的意见中认为模型存在低估侵蚀及长期验证不足的问题，建议对布莱耶、当皮埃尔、希农 B 和圣洛朗 B 四个厂址全部 14 台相关机组加厚堆坑和仪表间底板。

- **克吕阿**：厂房底板支承于抗震支墩，上下底板间存在与外部相通的夹层，使严重事故注水和泄压规程具有特殊性。监管机构于 2024 年接受 EDF 相应规程修改，同时要求补充长时间干式侵蚀后淹水的升压分析。实体改造改变了事故进程，操作策略也应随之调整。

- **格拉夫林：**监管机构于 2025 年 7 月通报了 1 号机组堆芯熔融物铺展区进水报警事件。事件起因是反应堆厂房总集水坑溢流，积水排出后报警消除，通报发布时异常水源尚未查明，该事件评定为 INES 1 级。

- **2026 年通用偏差**：EDF 在 9 月申报了铺展区隔水改造相关不符合项。改造所用金属止水构件高度为 2.1 米，构件上方原有墙体缝隙无法保障水密性，不能排除严重事故工况下发生渗水的可能。该问题涉及八个厂址共 28 台机组，EDF 将该事项报告为 INES 0 级事件，后续仍需持续跟踪整改情况并验证其有效性。

9. 硬核控制系统与严重事故相关仪表

硬核控制与仪表用于在极端危害和事故环境下获得必

要信息、控制相应设备。其实现并非另建一套完全脱离原系统的控制平台：部分既有执行机构和控制回路经验证后继续使用，再增加终极电源、切换和专用控制设备。应分别确认传感器、供电、信号传输、显示和人员操作所需的环境资格与可靠性，不能笼统认为原有仪表在严重事故下必然全部失效。

案例

- **比热**: 专项改造中的硬核配电切换设备及其试验要求，具体体现了新增设备与既有控制配电系统的衔接。其目标是提高功能可靠性，并不证明已经形成一条对所有风险完全独立的“第三套系统”。

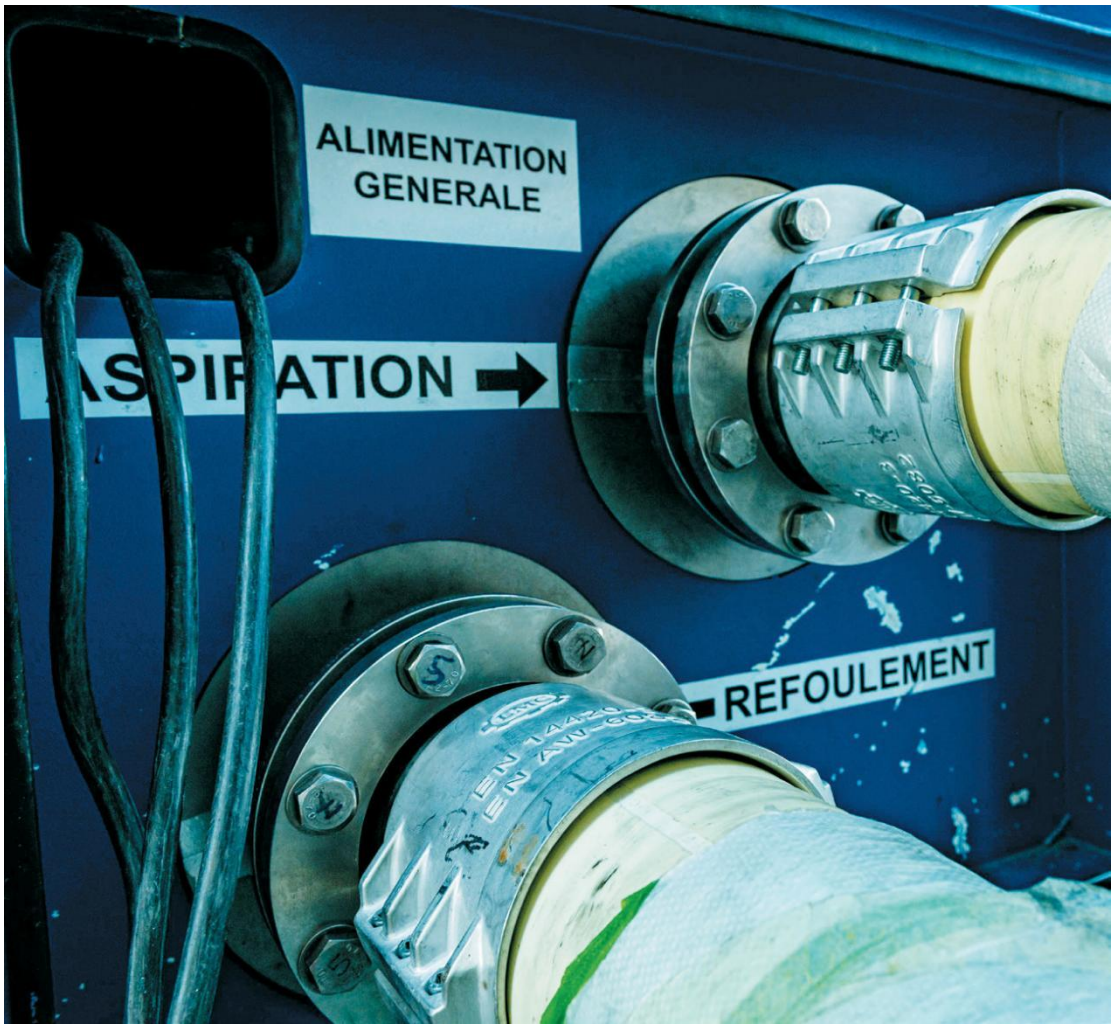
- **特里卡斯坦**：EDF 公开资料显示，4 号机组为压力容器失效监测设施配备了应急柴油机组供电；集水坑水位测量装置配置独立电源，并在电气厂房设置读数显示。整套方案具备明确的测点布设、供电链路与显示位置，用于支撑熔融物冷却与补水相关操作。

- **希农**：2026 年 VD4 计划列出 B2 机组第三路电气和控制系统，用于提升抵御极端危害的能力，体现了既有机组增加供电和控制手段的工程方向。

- **比热**：2026 年的相关资料显示，3 号机组原拟用于一回路硼浓度冗余、多样化测量的硼表，因可靠性问题未投运。

10. 当地危机中心（CCL）与应急通信保障

CCL 为厂内应急团队提供能够抵御极端外部危害、持续开展指挥与通信的场所，并与法国核应急快速反应部队及外部应急力量协同。主控室承担机组操作任务，CCL 支持现场应急组织履行指挥协调任务。建筑、通信、物资和人员组织须一并验证，确保应急中心能够持续运作。



案例

- **希农**：EDF 相关资料显示，B1 机组已将 CCL 列入硬核改造安排，要求其具备持续应急管理所需的可达性、自主

性和可居留性。

- **格拉夫林**：ASNR 发布的 2025 年度厂址评价中，明确提到新建 CCL 和终极水源的建设。ASNR 在 2025 年 2 月发布的检查函中，记录了对卫星电话、卫星数据传输设备以及配套测试、供电和冗余配置的核查，现场还开展了卫星链路接入应急消息系统、通过卫星传输图像的实操验证。

- **多机组应急支援**：ASNR 确认法国核应急快速反应部队已具备对同一厂址全部机组同时支援的能力。该能力与硬核改造相互补充，但应进一步考虑通行条件、移动设备接入情况、现场人员任务和演练情况，“24 小时内到场支援”并不意味着所有系统在任何灾害下都能于 24 小时内恢复。

小结

VD4 是法国 900 MWe 机组在运行约 40 年时，重新评价安全水平、落实安全改进的重要阶段。它将老化管理、设备符合性检查、福岛事故经验反馈以及严重事故缓解措施等一同纳入审查与实施过程，为机组后续运行补充安全保障。VD4 并非安全提升的终点，新增设备和措施能否长期保持可用，与既有系统能否可靠配合，以及事故操作能否在实际环境下完成，都需要通过在役检查、定期试验和运行经验反馈等不断验证。部分改造、补充论证和监管要求仍须在后续阶段持续落实并验证其有效性。随着机组运行年限增长，设备老化、难以更换部件的安全裕量、外部灾害、AI 等新技术的应用仍

将带来新的问题。要确保核电机组的长期安全运行仍有赖于安全理念、技术手段与监管要求同步演进，并持续推动安全改进。

国际交流合作部 曾超、反应堆部 杨志义 供稿

摘译自 ASNR、EDF 官网等

文章内容不代表本公众号观点