



MOX燃料在法国电力公司轻水堆中的使用经验

中法核燃料循环后端研讨会

2015年11月5日



摘要

1. 法国核燃料循环的总体介绍
2. 为使用MOX燃料对压水堆的改造
3. MOX燃料对反应堆运营的影响
4. 总结

法国核燃料循环的总体介绍

法国核电站

法国核电站

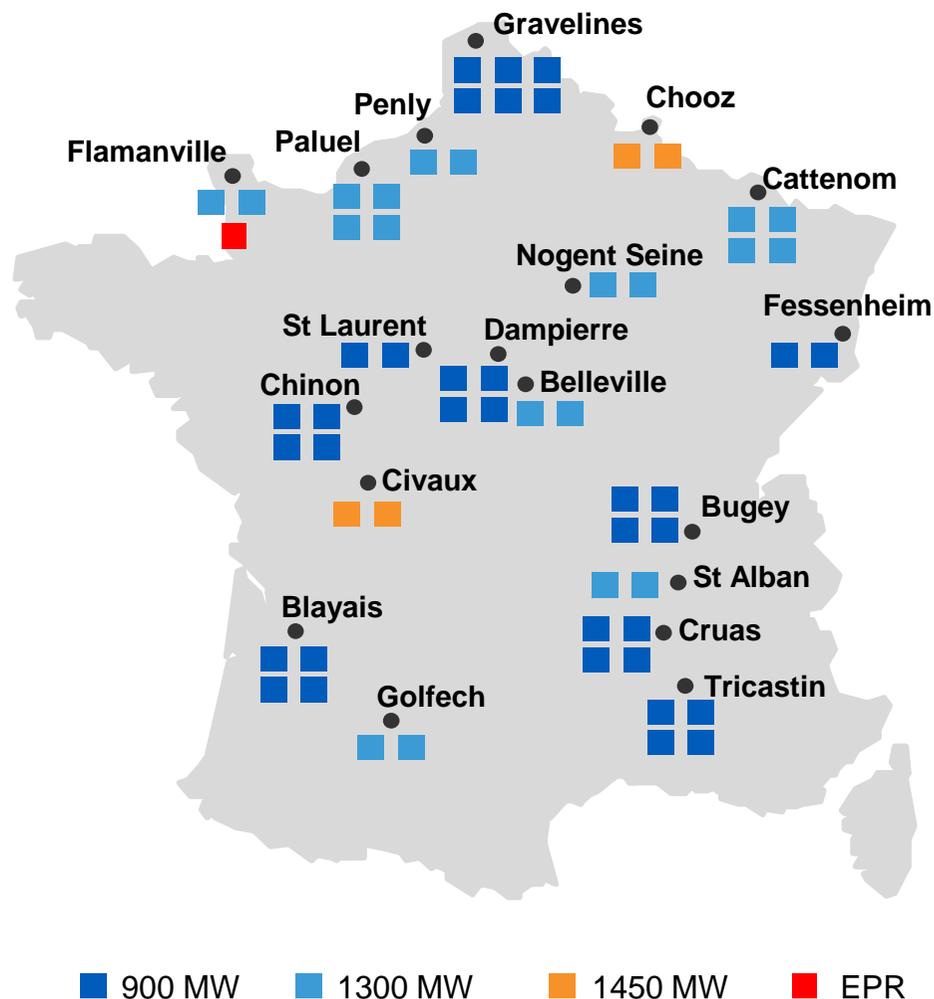
- 58 个运营中的压水堆核电站 (总装机容量 63 130 MWe)
 - 900 MWe : 34 个机组
 - 1300 MWe : 20 个机组
 - 1500 MWe : 4 个机组
- 1 个在建压水堆核电站: EPR 1600 MWe

截止2014年底

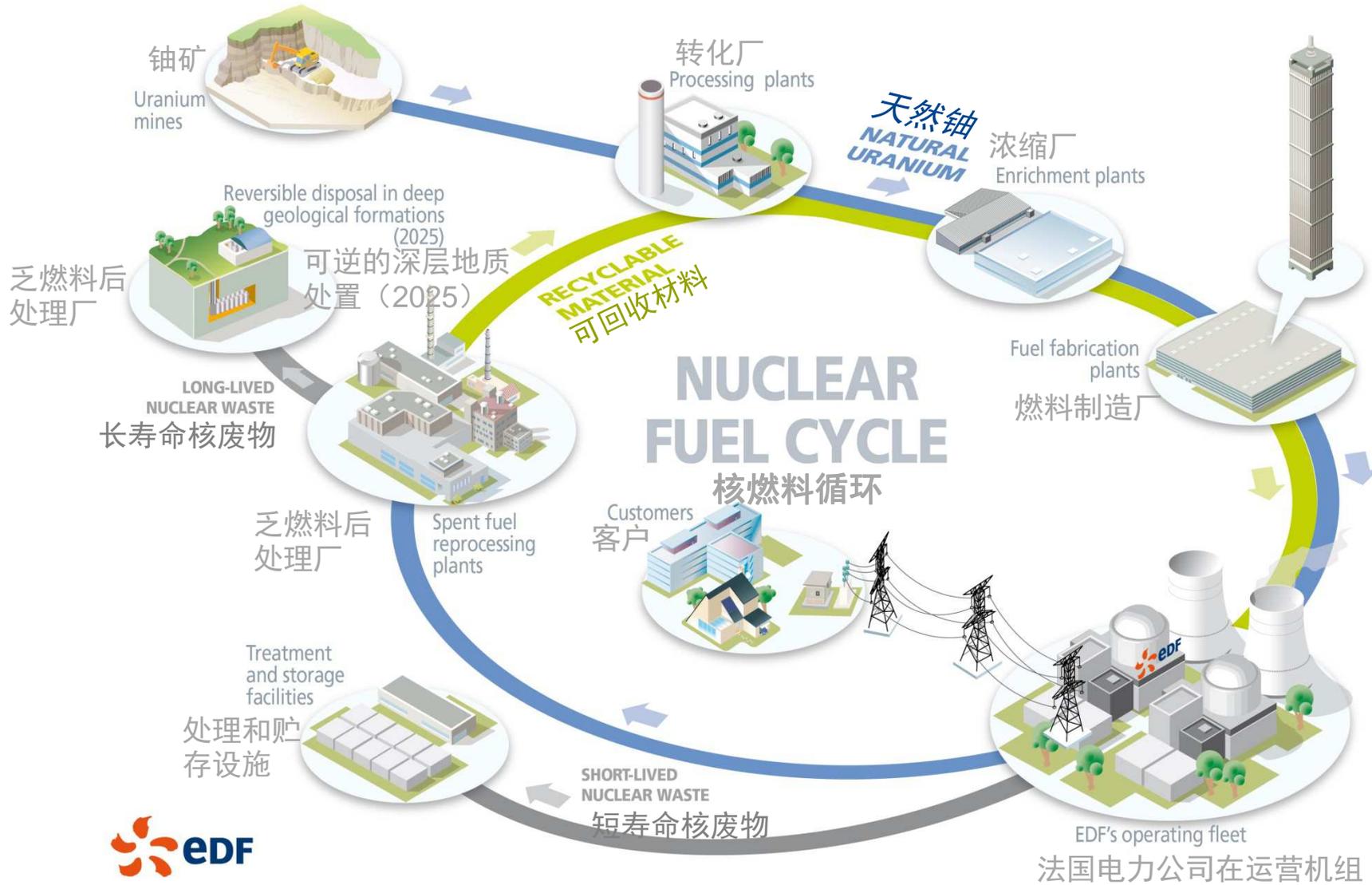
- 所有反应堆共装载80000个燃料组件 (其中 MOX燃料4500个, 回收铀燃料1350个)

法国电力公司2014年发电量:

- 核能发电 415.9 TWh (90.4%)
- 水力发电 37.5 TWh (8.1%)
- 火力发电 6.9 TWh (1.5%)



法国核燃料循环策略



法国后端核燃料循环策略

- 1980以来, 按照法国能源政策, 法国电力公司决定实施“一次”燃料闭式循环
 - 辐照后的燃料送至阿格后处理厂, 从废物（裂变产物和次锕系元素）中分离出铀和钚。
 - 后处理分离出的铀经过浓缩后用来生产回收铀燃料（ERU）
 - 钚和贫铀的混合物在马尔库勒的梅洛厂（MOLOX）用于生产MOX燃料
 - MOX燃料和回收铀燃料经过辐照后的乏燃料会安全地存储在水池中, 等待第四代快中子增值反应堆实现多次再循环
- 后处理可以减少废物体积节约铀资源
 - MOX燃料和回收铀燃料的使用可以节约将近2年的铀消耗量
 - 核废物量减少为原来的1/4
 - “一次”燃料闭式循环是实现燃料完全闭式循环的第一步, 钚会由第四代快中子增值反应堆实现多次再循环



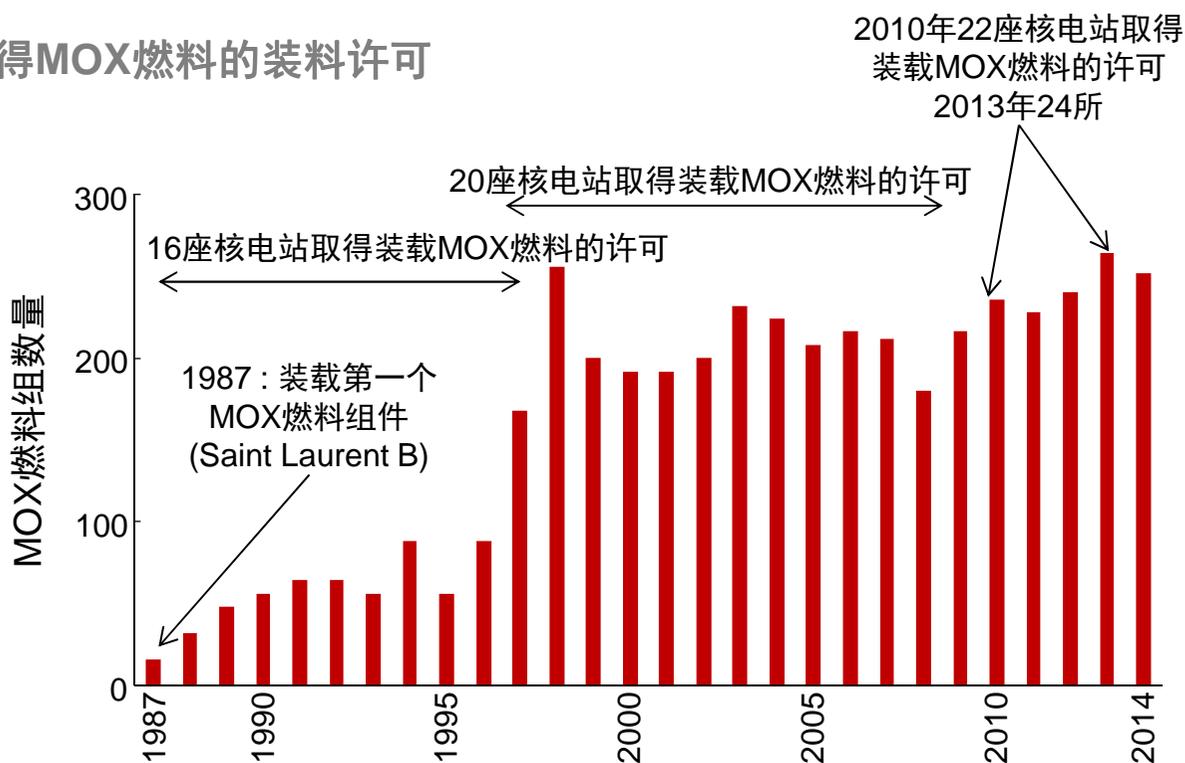
Copyright AREVA

MOX燃料在法国核电站的使用

- 约一年卸载的燃料经过后处理生产钚，用于制造MOX燃料
 - 乏燃料中1000吨的重金属可以得到10吨钚和120吨MOX燃料
 - 尽量缩短钚的中间存储时间，因为期间会不断产生镅元素，降低钚的品质，因此钚的回收分离不能被延误
 - MOX燃料组件的制造与UOX燃料组件类似，主要差别在于辐射防护装置

- 24个900 MWe压水堆机组已取得MOX燃料的装料许可

- 从1987年开始获得许可
- 最后两个机组（Blavais 3 & 4）于2013年获得许可，计划于2017-2018年实施MOX燃料装载



为使用MOX燃料对压水堆的改造

反应堆改造

- 堆芯中30%为MOX燃料=> 钚含量更高(0.5% -> 2%)
 - ⇒ 能量谱更高
 - ⇒ 降低反应控制棒效率(硼, 燃料棒束组件)

⇒ 为了弥补该影响

▪ 一回路

运行中或停机时的核反应控制

- 控制棒布局的加强 (8个新加的棒束组件)
- 硼补给槽的硼浓度增加到7500 ppm

▪ 安全注射系统

满足过冷事故和冷却系统失效事故的安全准则

- 补给水存储槽硼浓度的增加 (直到3000 ppm)

堆芯管理

堆芯管理的历史

堆芯中30%为MOX燃料

MOX / UOX燃料的区域划分横截面

按铀浓度分为3个区域

能量当量的增加:

从1987年到1995年:

UOX和MOX燃料3个批次, 年周期

– 每次换料: 16 MOX (3.25%当量) + 36 UOX (3.25%)

– 铀含量: 5.3% (可裂变铀: 铀总量的70%)

– UOX 最大燃耗: 36 GWd/t, MOX 最大燃耗: 42 GWd/t

从1995年到2007年:

UOX燃料4个批次和MOX燃料3个批次, 年周期

– 每次换料: 16 MOX (3.25%当量) + 28 UOX (3.7%)

– 铀含量: 5.3% (可裂变铀: 铀总量的70%) 然后**7.08%** (可裂变铀: 铀总量的63%)

– UOX 最大燃耗: 52 GWd/t, MOX最大燃耗: 42 GWd/t

从2007年到2014年:

UOX以及MOX燃料4批次, 年周期“**MOX燃料均等**”堆芯管理

– 每次换料: 12 MOX (3.7%当量) + 28 UOX (3.7%)

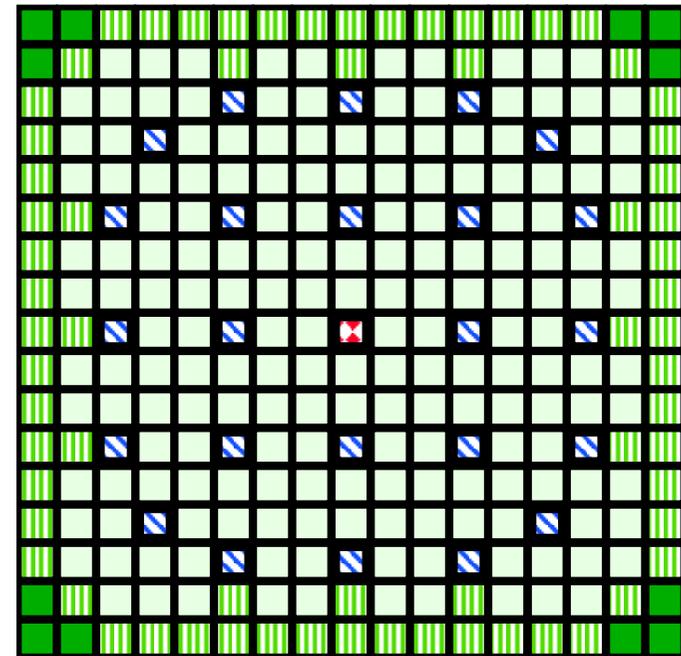
– 铀含量增加: 8.65% (可裂变Pu: 铀总量的63%)

– UOX/MOX 平均卸料: 48 GWd/t

– UOX/MOX 最大燃耗: 52 GWd/t

如果燃耗增加, 那么进行后处理的氧化铀燃料中的可裂变铀就会减少

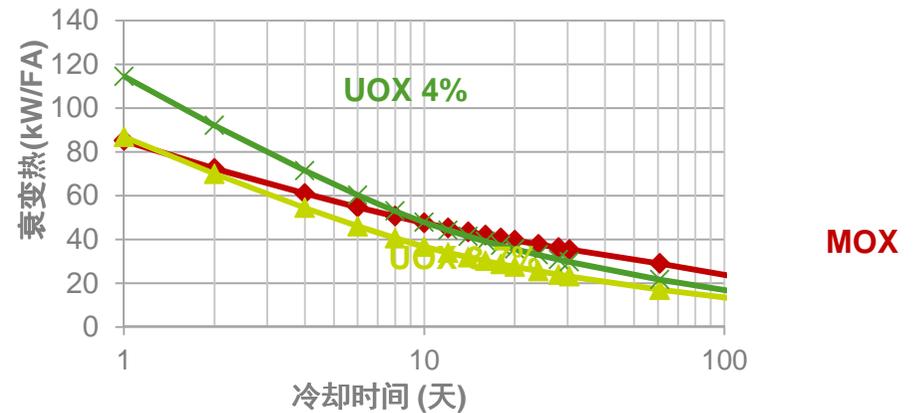
为实现能量相当, 需要增加MOX燃料中的铀含量



- 12 个低铀控制棒
- 68 个中铀控制棒
- 184 个高铀控制棒
- 仪控管
- 导管

针对MOX燃料的燃料厂设计改造

- MOX新燃料中的伽马射线和中子源(Pu238, Am241)
 - ⇒ 操作人员在运输和搬运过程中受到过量辐射的风险
- 燃料的接收以及存储改造 (出于辐射方面的原因)
 - 加固起吊机（硬件、软件）：起重量、可靠性、安全性、限制动作
 - 水下直接存储
 - 新MOX燃料组件通过摄像机在水下进行外观检查
 - 燃料厂房通风设备的紧急开关(红色的蘑菇头开关)
 - MOX搬运过程中对厂址加强安全保障（传感器摄像头、燃料厂房门禁...）
- 冷却3、4年后进行乏燃料运输
 - MOX燃料衰变热减少更慢



STRAPON TIN calculations

新MOX燃料的运输

- 使用MX8运输容器运输新燃料：与乏燃料运输容器的设计类似
 - 2004年7月开始使用
- 主要目标：
 - 提高运输安全性和加固核材料的保护设备
 - 减少卸货时的辐射剂量
- 降低剂量取得的成果：
 - 2012年平均辐射剂量：0.7 mSv / 次
 - 最大剂量：1 mSv / 次运输（伽马射线和中子流各半）
 - 由于采用了自动化搬运设备，减少了操作人员生物防护措施的使用



新MOX燃料使用MX8运输

Copyright AREVA



新UOX燃料使用FCC运输

Copyright AREVA

辐照后的MOX燃料的运输

- **MOX乏燃料的运输使用标准乏燃料运输容器**
 - 每个运输容器装载4个MOX燃料组件（中心区域）和8个UOX组件（边缘区域）
 - 每年运输20到60次到阿格后处理厂
 - UOX和MOX发货时的平均辐射剂量相近
 - 乏燃料运输中的辐射占年总辐射剂量的1%不到
- **TN 112: MOX燃料专用的新乏燃料运输容器**
 - 容量：12个MOX燃料组件
 - 相对TN12对中子流的保护性能更好
 - 在乏燃料运输中具有更大的灵活性
 - 第一个TN113容器2008年开始使用，第二个在2015年



TN 12

Copyright AREVA



TN112

Copyright AREVA

MOX燃料装料许可与法规

- 对于新获得MOX装料许可的堆芯，需要提交安全报告
 - 意外瞬变研究检查
 - 新操作技术规格
 - 材料和文件的修改技术报告
- 对新燃料（MOX）组件取证所需的安全报告
 - 中子学设计报告
 - 热工水力设计报告
 - 力学设计报告
 - 棒热机械设计报告
 - 冷却水失效事故
- 操作反馈经验：MOX燃料辐照年度报告
 - 堆芯物理启动测试和通量分布图：预测值与计算值的良好吻合
 - 停机时的目视检查：外形，腐蚀（预计中的）
 - 新燃料交付和运营过程中的辐射剂量
- 均等MOX：
 - 2001年决定实施，需2年进行安全性研究，4年取证（包壳腐蚀，燃料气体释放...）

MOX燃料对反应堆运营的影响

影响总结

- **对900MWe压水堆核电站的可用性没有影响**
 - 相同的年周期
 - 由于热衰退提高，停机时间略有增加
- **对可操作性无显著影响**
 - 对于所有使用MOX燃料的机组（1995年开始允许装料，并且在Saint-Laurent1号和2号机组平稳运营5年后）
 - 功率瞬态时的轴向通量稳定性更好（氙效率更低）
- **对环境的少量废物排放并不增加**
 - 功率瞬变期间流出物减少（30%）
 - MOX燃料厂和UOX燃料厂的气液态废物排放量相近
- **对辐射防护没有影响**
 - 停机期间的辐射剂量主要由于维修
 - 对燃料敏感度低(损耗和钚含量)
- **即使供应链故障，MOX燃料可以用UOX燃料替代换料**
- **福岛事件对MOX燃料没有特别影响**

总结

总结

- 核燃料循环的不同步骤紧密连接
- 该策略节省了核原料，减少了核废物
- MOX燃料在核电站中的使用已经是法国电力公司的常规操作，虽然其相关的操作有一定特殊性，尤其是物流方面
- 2007年起，“均等MOX”管理方式的实施实现了MOX燃料和UOX燃料之间的性能平衡
- 每一阶段都结合了核电的技术和经济性能
- MOX燃料在压水堆的应用是可持续的燃料循环的第一步，为钷在第四代快堆中的多次循环铺好了路。

谢谢！