

中国核燃料循环现状与发展

China's Nuclear Fuel Cycle Status and Future Development

刘学刚

清华大学 核能与新能源技术研究院

中国核能开发的现状和动向
科学技术振兴机构 五番町别馆
2017年2月22日

1. 国家战略：核电与闭式燃料循环

中国：年轻却高速发展中的核电国家
选择闭式核燃料循环的支持核电发展

2. 中国核燃料循环发展现状与规划

建设独立、完备的闭式核燃料循环体系

核燃料循环前段

核燃料循环后段

3. 问题与挑战

中国是一个“年轻的”核电国家

- 1994年，第一座核电站投入商业运行，至今仅23年。
- 截至2017年1月，商业运行核电机组35个，总装机33.6 GWe，核电占发电总量的~3.6%（@2016年）
- 目前，中国核电站的累计商业运行经验仅230堆年



大亚湾核电站

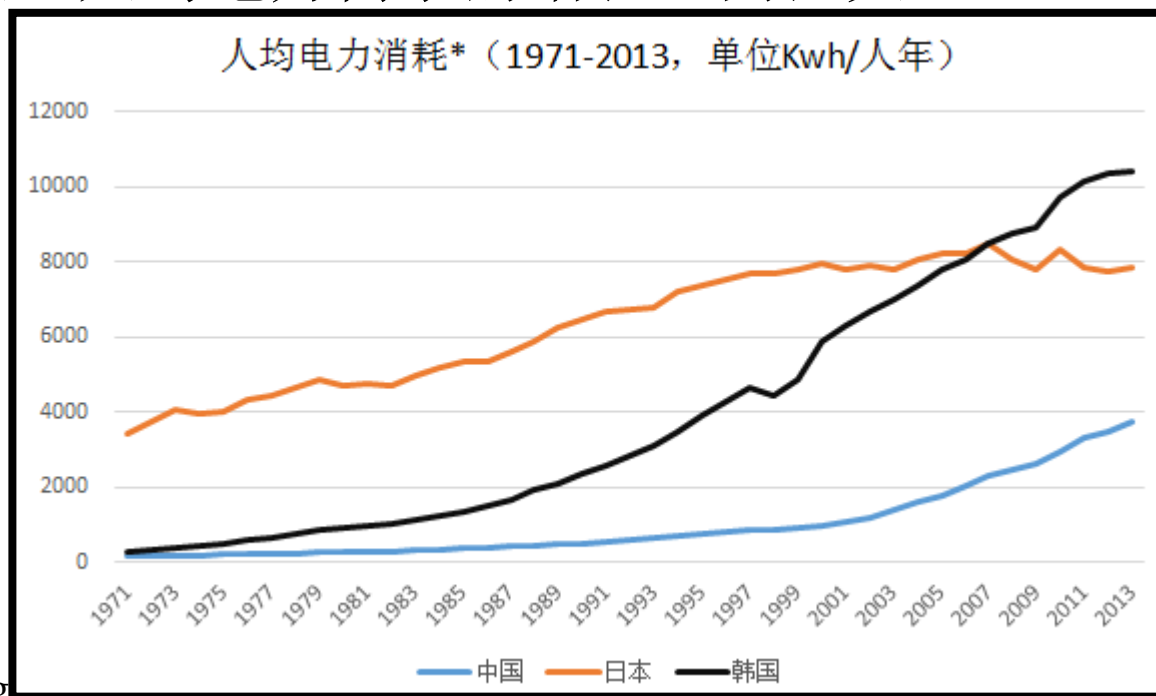
位于广东深圳市大鹏半岛
中国第一座投入商业运行的大型商用核电站
1994年5月正式投入商业运行

中国也是一个“高速发展中”的核电国家

- 2017年1月，在建核电机组21个，约占全球在建核电机组的三分之一
- 雄心勃勃的发展计划：到2020年时，58 GWe核电机组建成并运行，另有30GWe机组在建

1、电力需求增长的预期

- 中国人均电力消耗呈现快速增长
- 2013年，人均电力消耗仅为日、韩的1/2和1/3左右
- 人口基数庞大，人均电力需求的增长空间巨大



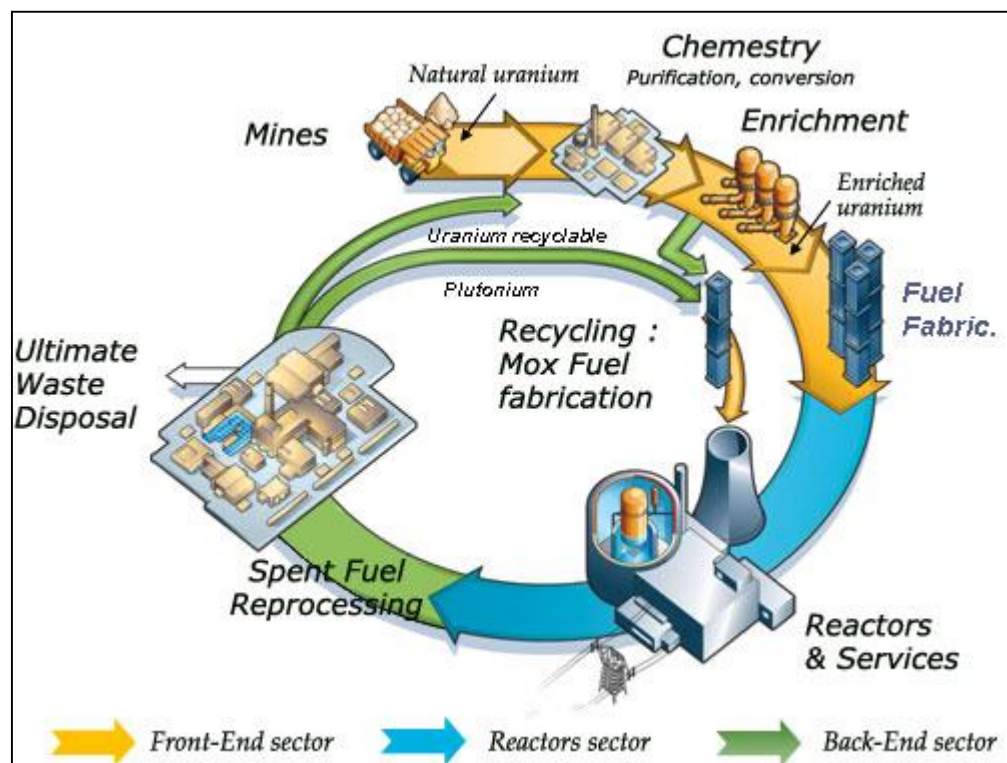
2、能源安全的焦虑

3、能源结构转型与环境保护的需求

- 一次能源中煤炭比重过高（2015年一次能源中原煤比例*：中国64%、日本27%、韩国31%、美国17%）
- 雾霾、大气污染



中国核燃料循环的需求



核燃料循环：

包括铀资源供应、核燃料制造、乏燃料管理、核电废物处理、处置等一系列环节的全部过程

核燃料循环是保障核电发展的必备基础

中国核电的可持续发展离不开配套、健全的燃料循环体系

中国核电发展“三步走”的技术路线

- 三步走：热堆（压水堆）-快堆-增殖堆
- 钚（铀）的回收复用，是快堆发展的物质基础

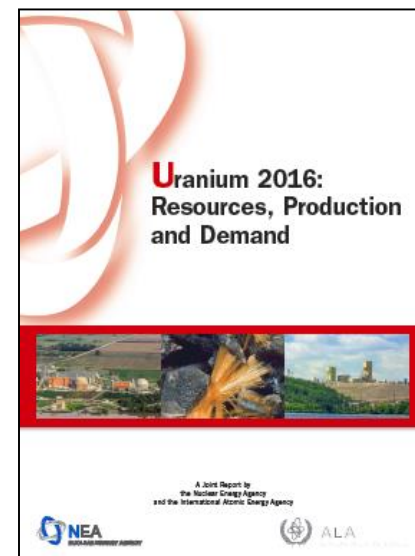
影响核燃料循环战略选择的关键因素

- 保障燃料供应
- 废物妥善管理
- 产业自主与技术创新

确定进行乏燃料后处理，并回收铀钚复用的闭式核燃料循环技术路线，建立独立、完备的核燃料循环体系

1、铀资源供应

- IAEA 《铀资源红皮书-2016》：
中国铀资源 (RAR) 17.33万吨 ($<130\$/\text{kgU}$)
- 以1 GWe核电年需160 tU天然铀，寿期40a计算：60 GWe核电装机全寿期需要天然铀总量为38.4 万吨、年需天然铀约9600吨
- 中国自身铀资源保有量与核电发展需求，存在巨大缺口

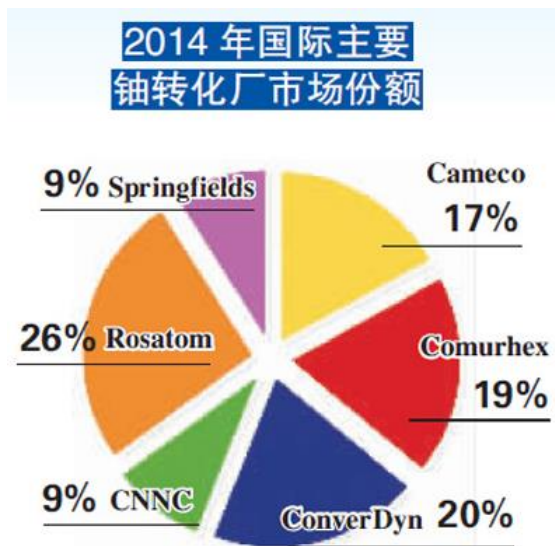


1、铀资源供应：三个途径保障供应（三个1/3）

- 国内勘探和开采：2000年来，在中国北方的伊犁、吐哈、鄂尔多斯、二连、松辽、巴音戈壁等盆地新形成了6个大型铀矿资源基地；中国南方的江西、广东等老矿区深部和外围勘探成果明显。铀资源勘查开发布局由以南方为主转变为南北方并举的新格局
- 投资国际铀矿企业
- 国际铀资源市场采购
- 2015年*：中国国内铀矿产量1616 tU；国外两途径进口铀矿约8160 tU

2、铀转化

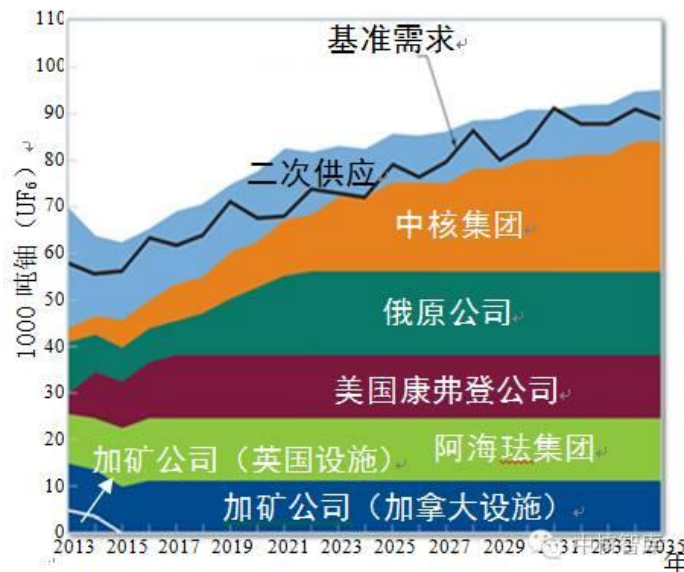
- 公开信息显示，中国在役铀纯化转化设施实际产能为每年5000吨，在建铀转化设施产能每年9000吨左右。在建设施投产后，产能达到每年14000吨*。



2014年国际铀转化市场份额*

*来源：中国能源报，2015年8月

**来源：中核智库，2016年7月11日



2035年前国际铀转化市场供需预测**

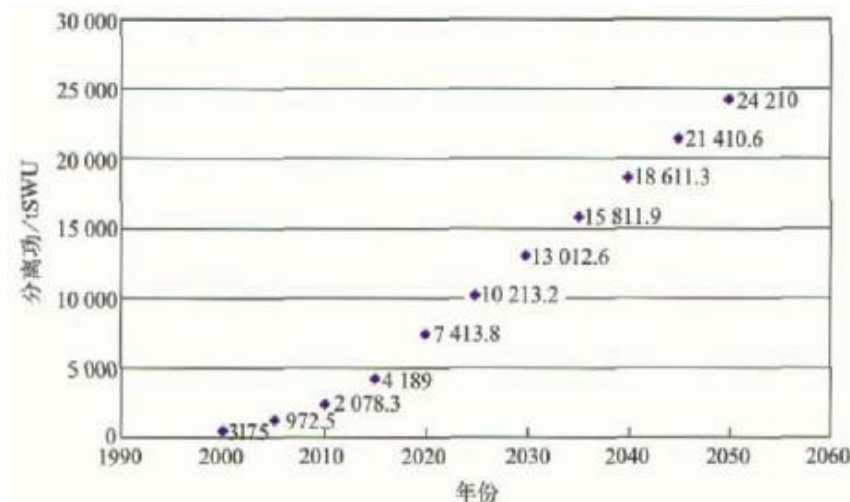
3、铀浓缩

- 加快国产化和积极引进并举的发展策略
- 全面实现了扩散法向离心法的技术过渡

China Uranium Enrichment Capacity

Plant	Province	Annual capacity (million SWU) 2015	Projected capacity 2020
Hanzhun	Shaanxi	2.2	2.2
Lanzhou	Gansu	3.56	6.52
Heping 814	Sichuan	0.4 (uncertain)	0.4
Emeishan	Sichuan	0.8 (part built)	1.6 - 2.4
Estimated total		5.7 - 7.0	10.7 - 12.0

中国铀分离供应情况和预测*



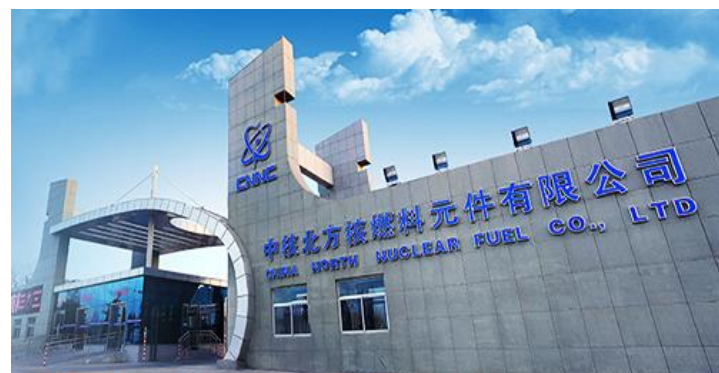
中国分离功需求情况预测**

*来源：World Nuclear Association *Nuclear Fuel Report*, September 2015

**来源：李冠兴，我国核燃料循环前端产业的现状和展望，中国核电，2010.1

4、燃料制造

- 反应堆堆型、燃料多样化的特点
 - 压水堆：M310、VVER、AP1000、EPR.....
 - 重水堆：CANDU
 - 高温气冷堆：HTGR
- 全部堆型燃料都实现了国产化
- 形成南北两个燃料生产基地
 - 中核建中核燃料元件有限公司
 - 中核北方核燃料元件有限公司



1、乏燃料的产生

- 1 GWe的PWR电站每年产生乏燃料20-25tHM
- 预计2020年（按58 GWe在运规划）时，乏燃料产生量>1000 tHM/a，累积量~7000 tHM
- 早期电站的乏燃料在堆贮存能力接近饱和*

电站名称	预计贮存饱和时间
大亚湾1&2	2003 and 2004
秦山I期	2025
秦山II期1 & 2	2016
岭奥I期1 & 2	2016
秦山III期1 & 2	2042 and 2043
田湾I期1 & 2**	2016

*来源: 乏燃料后处理进入关键升级期, 中国能源报, 2014年12月22日

**：马敬，刘继连. 乏燃料，看看田湾核电站乏燃料离堆怎么贮存，能源情报

2、乏燃料中间储存

- PWR乏燃料离堆贮存能力
 - 中核404有限公司
 - 总能力550 tHM，包括500tHM商用乏燃料和50tHM研究堆燃料
 - 水法贮存，目前容量已经饱和
- PWR离堆贮存扩建工程900tHM，已经完成*
- 有计划建设3000-6000tHM的乏燃料中间贮存设施**
- 秦山III期（重水堆）和在建高温气冷堆电站均采用了乏燃料干式贮存技术

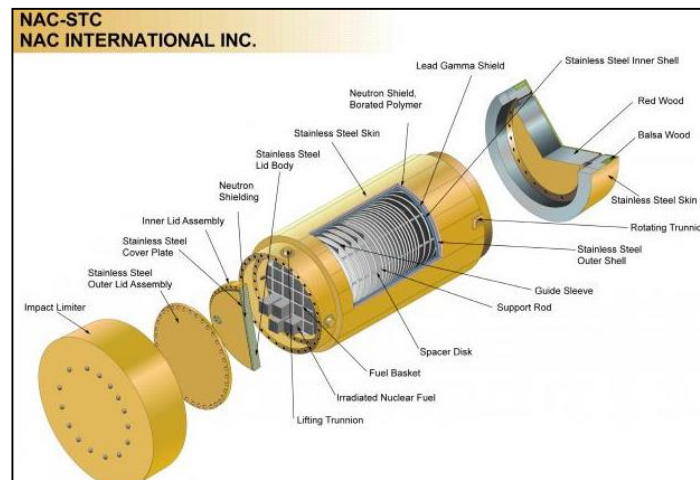


*：马敬，刘继连. 乏燃料，看看田湾核电站乏燃料离堆怎么贮存，能源情报

**：DAI YUNXIU. Introduction of the large reprocessing plant in China, June 2010

3、乏燃料运输

- 乏燃料运输：中核清原环境技术有限公司
- 2003年中标运输业务
 - 从大亚湾核电站运输至中核404有限公司
 - 单程3720km，穿越7省
- 运输能力和运输容器*
 - 2台NAC-STC型（26组件）和1台Hi-star 60型（12组件）运输容器
 - 每年运输量104组件



26 (17*17) PWR assemb. in each cask

Mass of U: 464 Kg/assembly

Enrichment: $1.7 < (\text{wt}\% \text{ } ^{235}\text{U}) < 3.3$

Burnup: $< 40 \text{ GWd/tU}$

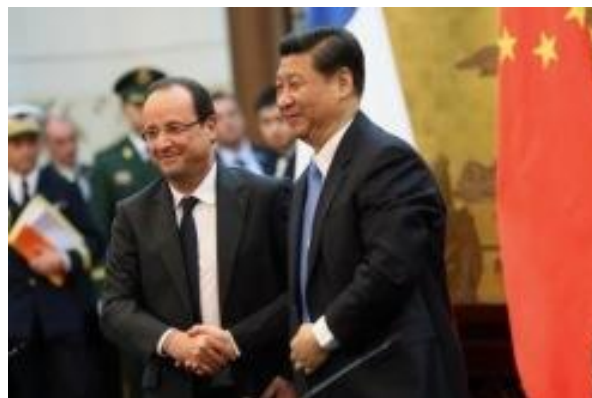
4、中国的乏燃料后处理——中试厂

- 中国已经建成一座商用乏燃料后处理中间试验厂（简称“中试厂”）
- 设计处理能力50 tHM/a，位于中核404有限公司（甘肃）
 - 1987年开始设计、验证；1998年全面启动建设
 - 2004年开始调试工作
 - 2010年12月成功完成热调试



4、中国的乏燃料后处理——800tHM/a后处理大厂

- 2007年中核集团（CNNC）和法国AREVA集团签订关于建设后处理再循环厂的意向书*
- 2013年4月，在中法领导人见证下双方签订《中法合作建设大型商用后处理-再循环工厂项目合作意向书》**
- 2014年3月，双方又签署了关于后处理再循环长期合作谅解备忘录



→ 2013年4月，
在中法领导人见
证下双方签订合
作意向书

*: AREVA PRESS RELEASE, Nov.6, 2007

**www.world-nuclear-news.org/WR_China_approaches_reprocessing_commitment_2604131.html

4、中国的乏燃料后处理——200tHM/a后处理厂

- 2012年中核集团（CNNC）发布“龙腾2020”科技创新计划*，公布了建设中国自主知识产权的200吨商用乏燃料后处理示范工程的计划
- 预计在2020年前开工建设
- 2016年3月成立“中核龙瑞”公司负责相关业务

5、放射性废物处置*

- 已建成三座中低放废物处置厂，正在计划5座中低放废物处置厂
 - 甘肃省西北处置厂
 - 广东省北龙处置厂
 - 四川省飞凤山处置厂
- 高放废物地质处置厂
 - 正在开展地下实验室选址和项目启动工作
 - 计划未来5-10年建成地下实验室

1、核燃料循环前段：

工业规模有待扩大、技术水平有待提高。需要在满足国内核电需求前提下，借鉴核电“安全、高效”发展方针，提高国际市场竞争力。

2、核燃料循环后段：

亟待建立一个独立、完备的闭式核燃料循环体系。

3、核燃料循环法律法规亟待健全、管理水平亟待加强、人才供需缺口大

相对核电站，核燃料循环的法规和管理制度欠缺，缺少针对性的管理办法，专业人才匮乏

4、核燃料循环工业应用与基础研究脱节

工业水平的提高必需与设备设计、制造、材料等领域的基础科研进步相结合

5、核电产业链的利益分配机制有待优化

6、全行业加强核安全文化、提高公众接受性

Thank you



Contact information

LIU Xuegang

Associate Professor, Deputy director

Nuclear chemistry and engineering Division

Institute of nuclear and new energy technology

Tsinghua University, Beijing, China

Liu-xg@mail.tsinghua.edu.cn