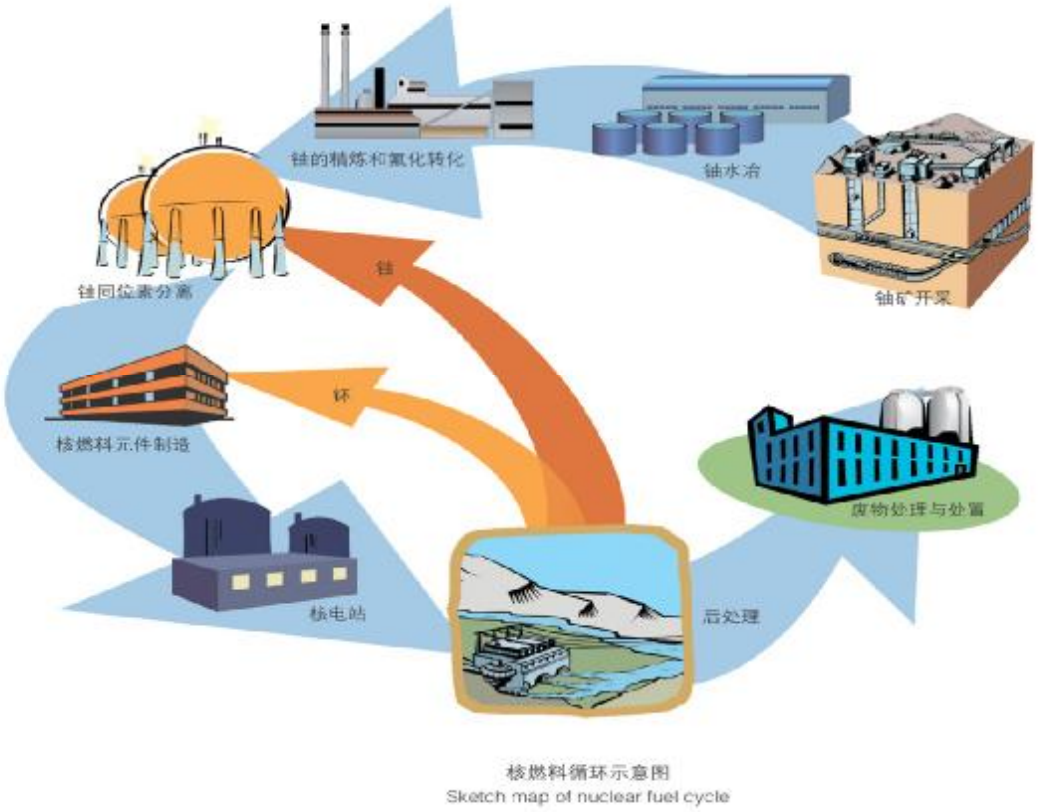
明德博学，求是致远

核燃料循环



核燃料循环示意图
Sketch map of nuclear fuel cycle

主讲 夏良树 博士 教授

南华大学·核资源与核燃料工程学院

核燃料循环

目　　录

第1章 原子核内部世界

第2章 世界核工业的发展历程

第3章 核燃料循环过程

第4章 铀及铀的化合物

核燃料循环

目　　录

第5章　铀矿的采冶

第6章　铀化学浓缩物的精制（纯化）

第7章　铀化合物的转化

第8章　铀同位素的分离与富集

第9章　核燃料材料的制备

核燃料循环

目　　录

第10章　核燃料元件的制造

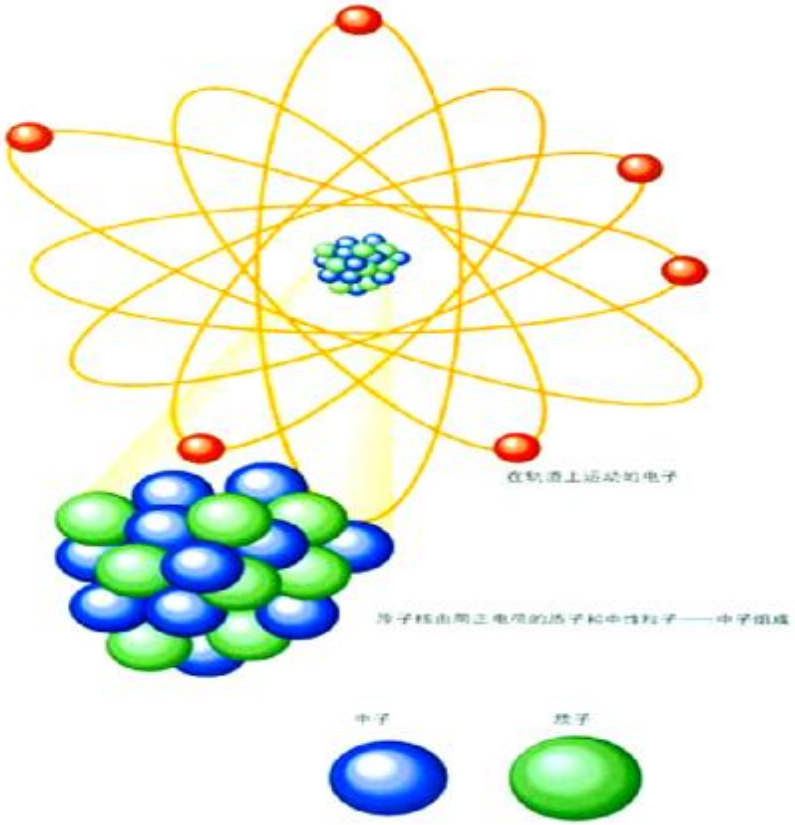
第11章　核燃料元件入堆“燃烧”

第12章　乏燃料后处理

第13章　乏燃料废物最终处置

第1章 原子核内部世界

- ◆原子核的组成



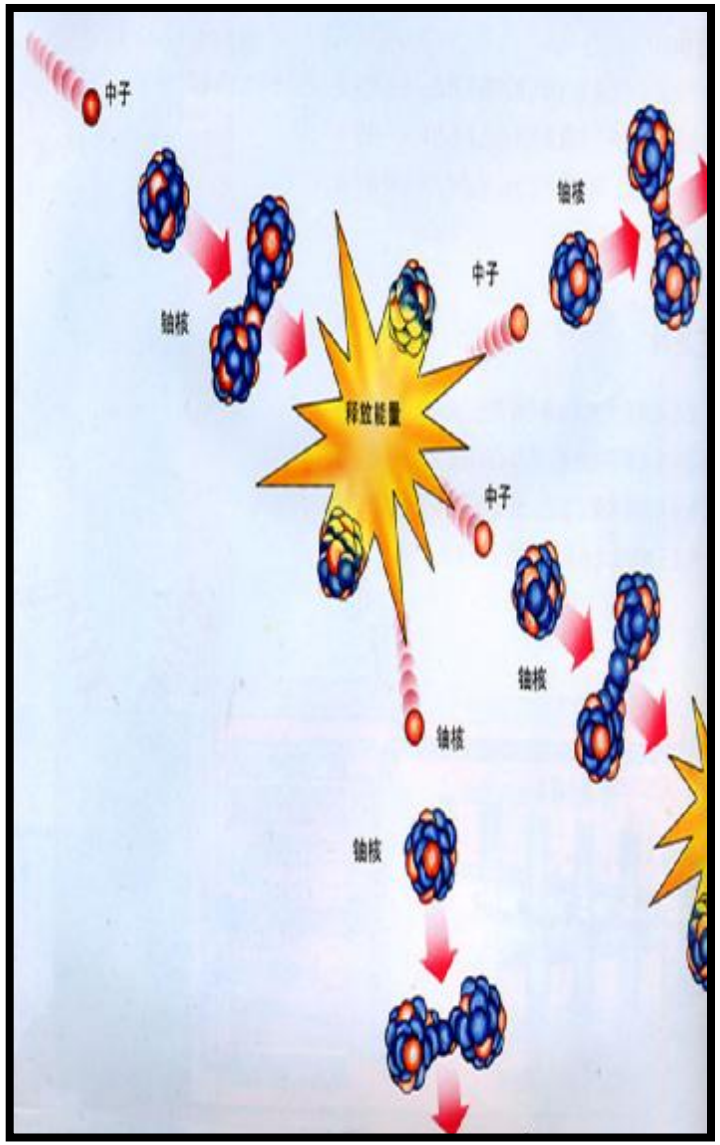
问题

1. 原子核是不是最小的粒子？

2. 事实或现象

核燃料循环

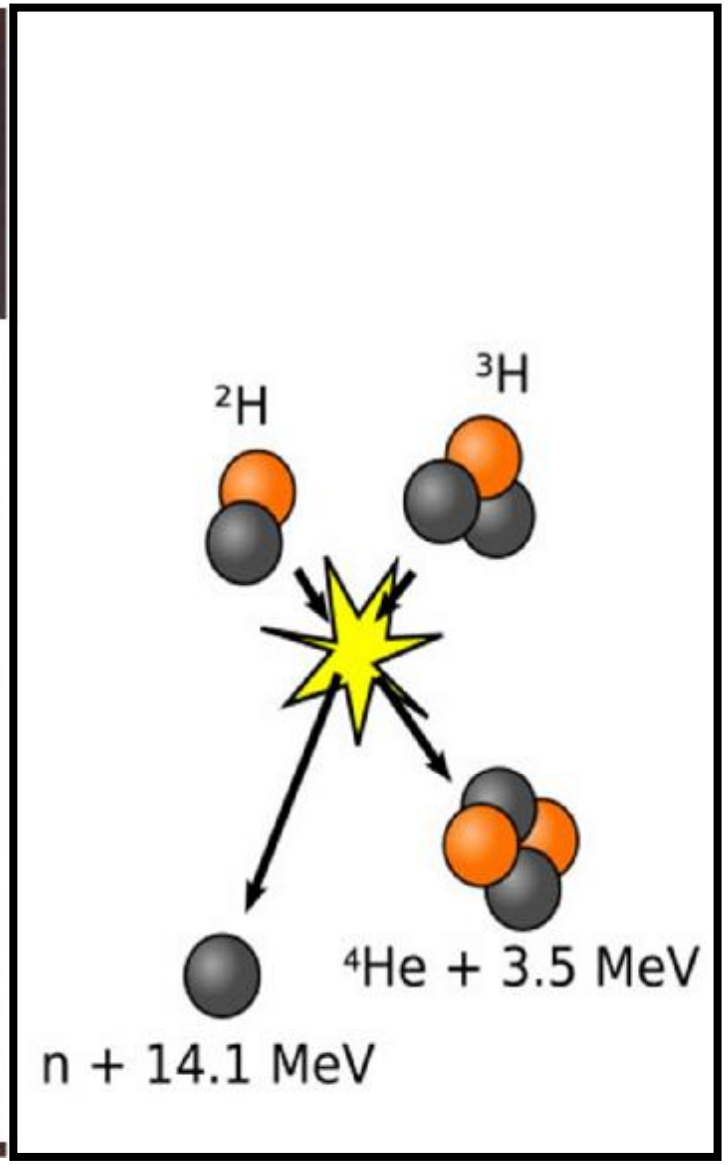
第一章 原子核
内部世界



$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \longrightarrow ^{90}_{38}Sr + ^{136}_{54}Xe + 10\ ^{1}_{0}n$$

核燃料循环

第一章 原子核
内部世界



$$^{2}_{1}H + ^{3}_{1}H \longrightarrow ^{4}_{2}He + ^{1}_{0}n + 14.1Mev$$

核能

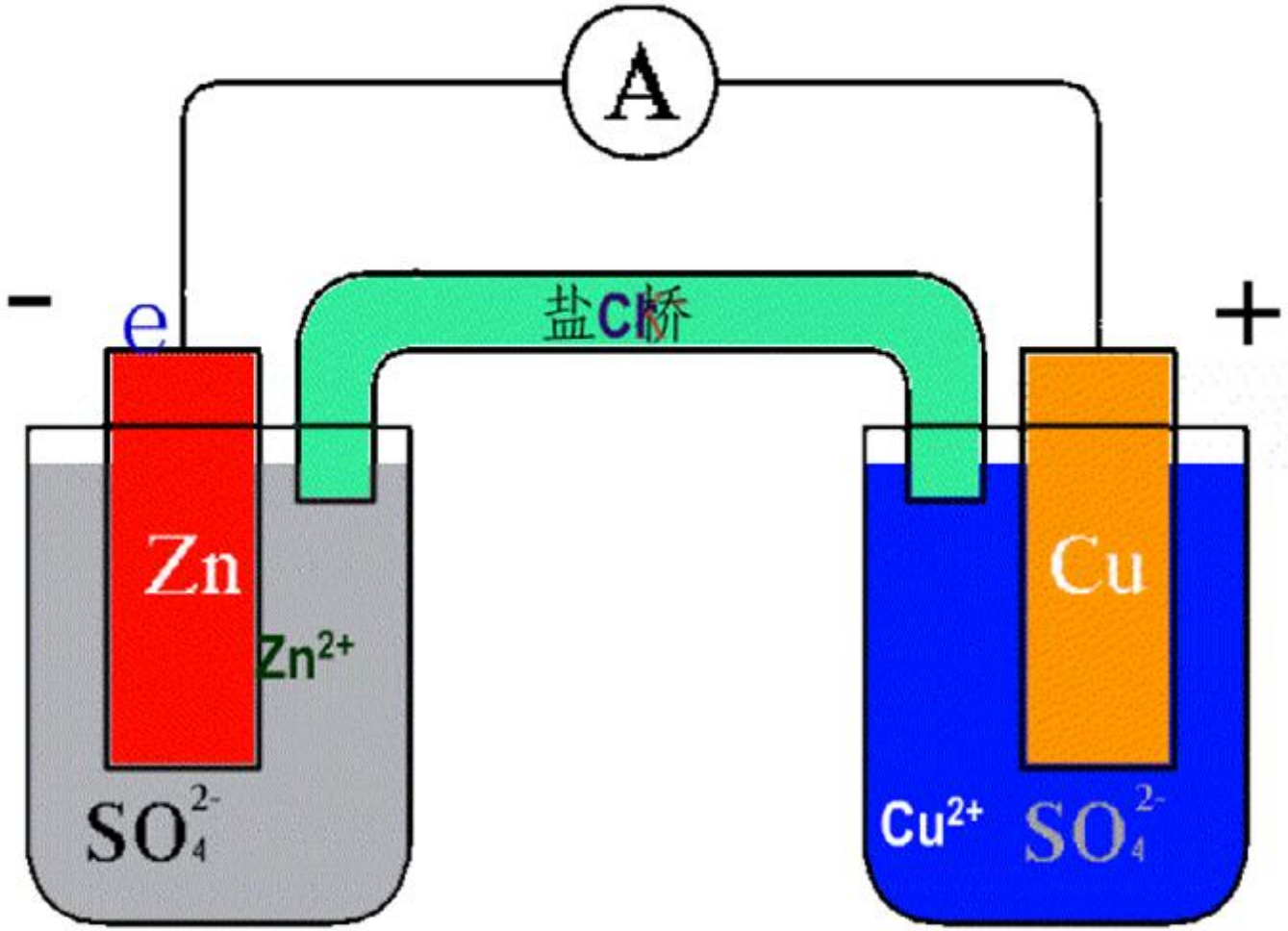
原子核发生变化时放出的能量

化学能

原子发生变化时放出的能量

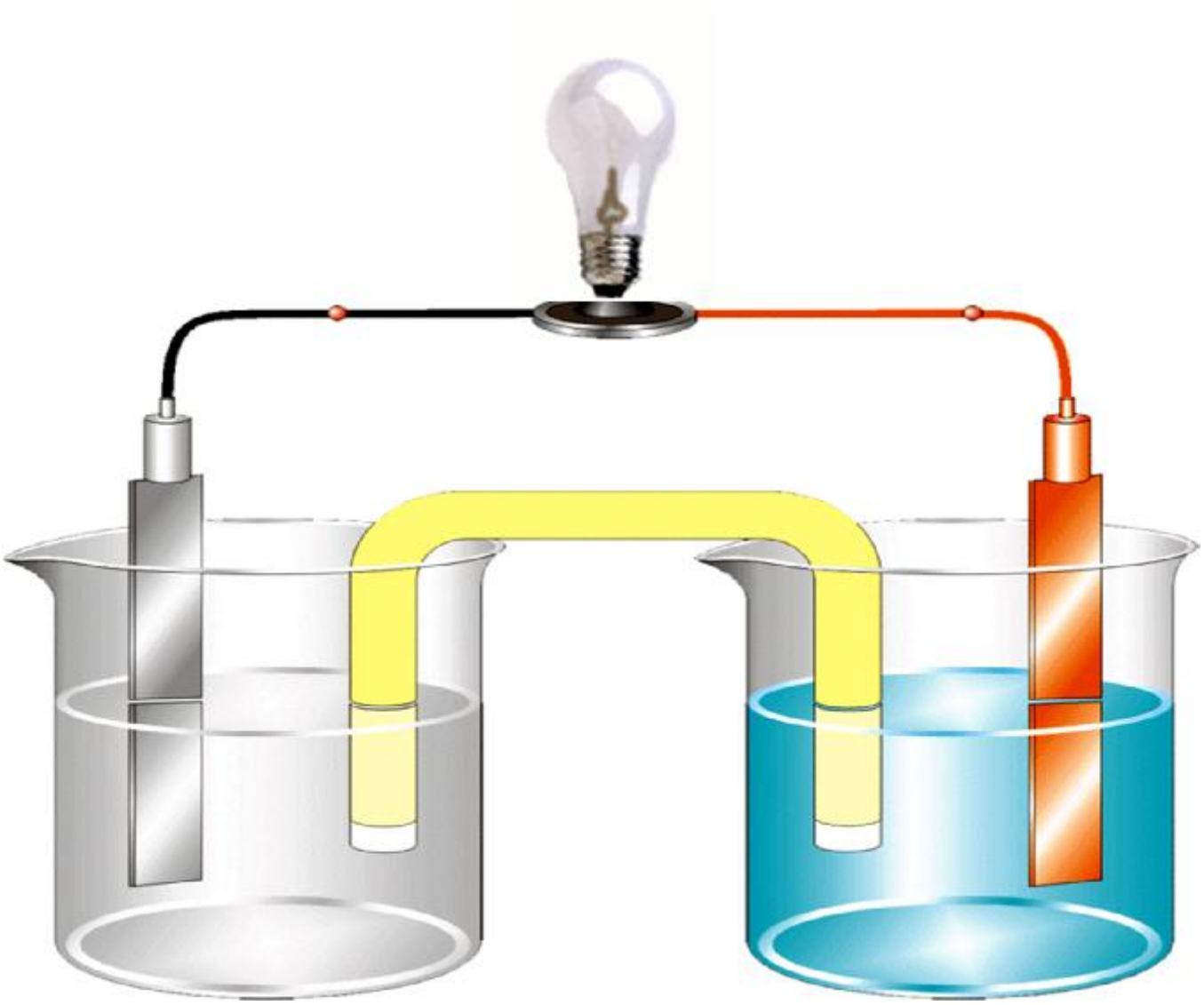
核燃料循环

第一章 原子核内部世界



核燃料循环

第一章 原子核
内部世界



核能到底有多大？

举例： 235 -铀的裂变

裂变方程：

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \longrightarrow ^{90}_{38}Sr + ^{136}_{54}Xe + 10\ ^{1}_{0}n$$

锶　　氙

裂变方程：

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{90}_{38}Sr + ^{136}_{54}Xe + 10\ ^{1}_{0}n$$

裂变前　　裂变后

$^{235}_{92}U$	235.0439u
$^{1}_{0}n$ + ）	1.0087u
总质量	236.0526u

$^{90}_{38}Sr$	89.9077u
$^{136}_{54}Xe$	135.9072u
$10\ ^{1}_{0}n$ + ）	10.0867u
总质量	235.9016u

质量减少了： 235.9016u- 236.0526u

$\Delta m = -0.1510u$

根据爱因斯坦质能公式：

1个235-U裂变释放能量：$\Delta E=\Delta mc^2=141Mev$

$1MeV=1.6\times10^{-13}J$

那么，1摩尔铀235原子核完全裂变所释放的能量：

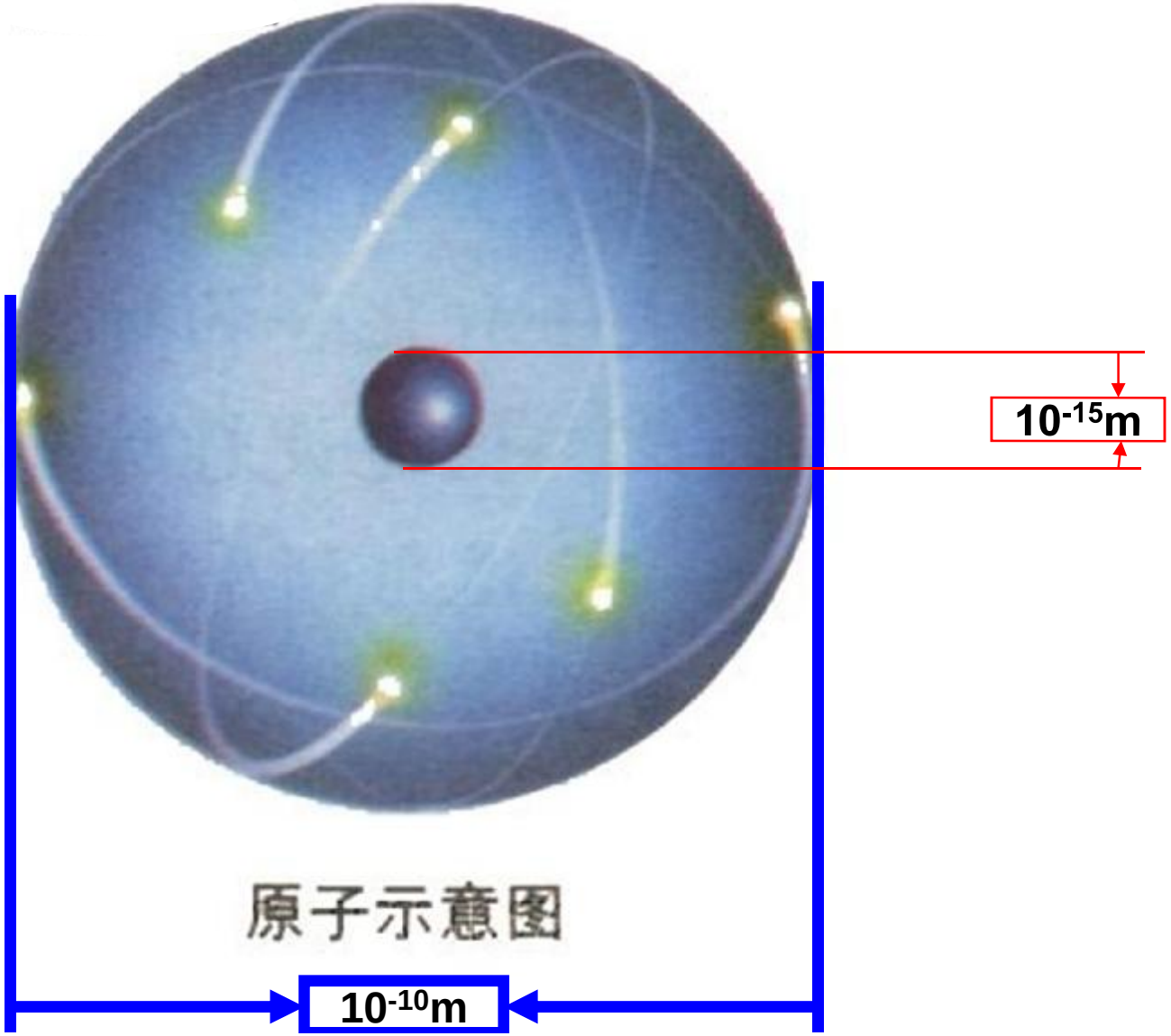
$=1\times6.02\times10^{23}\times141MeV$

$=1.36\times10^{10}$ KJ 。

能量相当于634吨标准煤燃烧释放的能量。

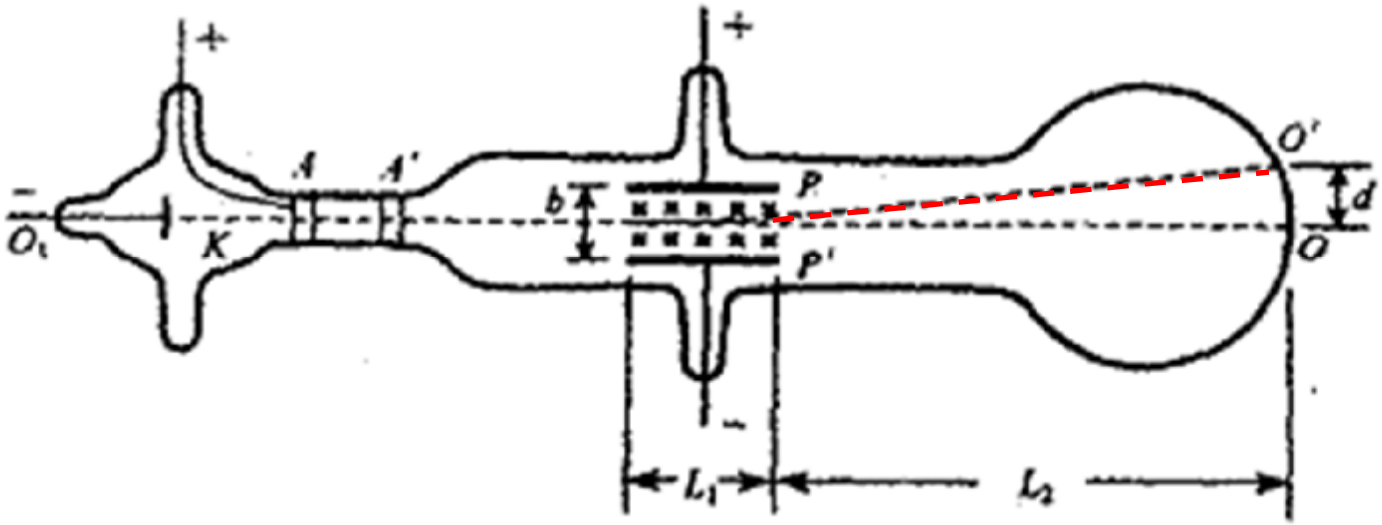
案例：火电厂和核电厂比较

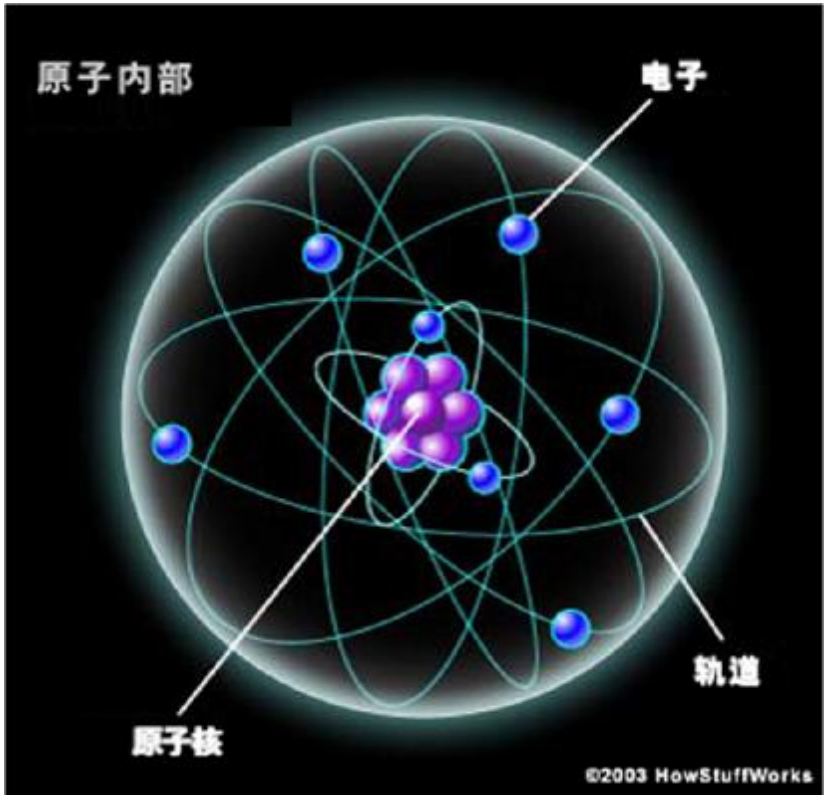
原子核的组成



原子示意图

1897年英国物理学家汤姆生在研究阴极射线时发现了电子





电子的发现把人们带入了**原子内部**的世界。

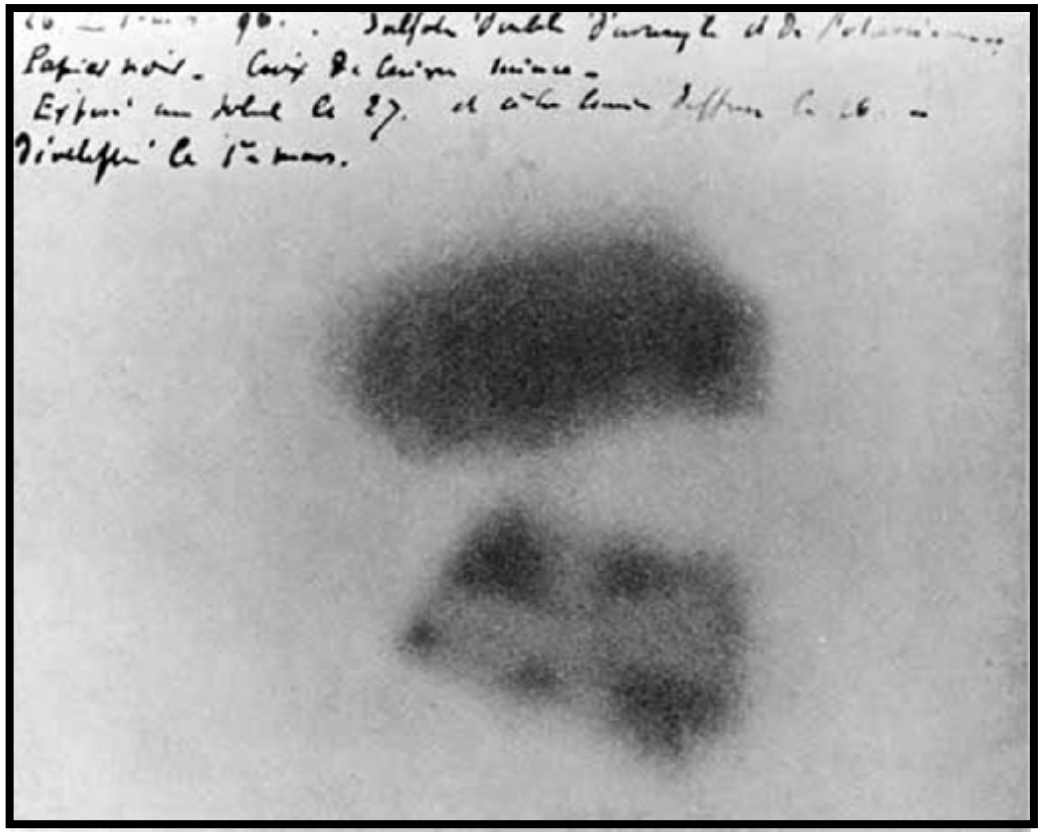
核燃料循环

第一章 原子核
内部世界

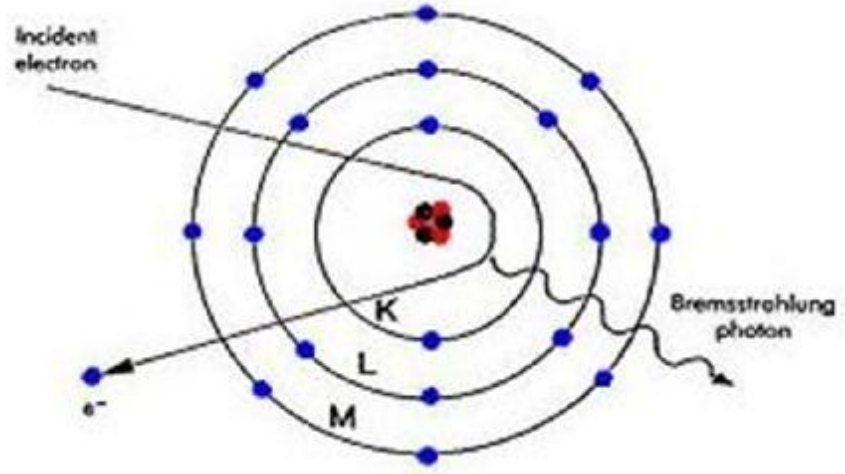
放射性现象的发现

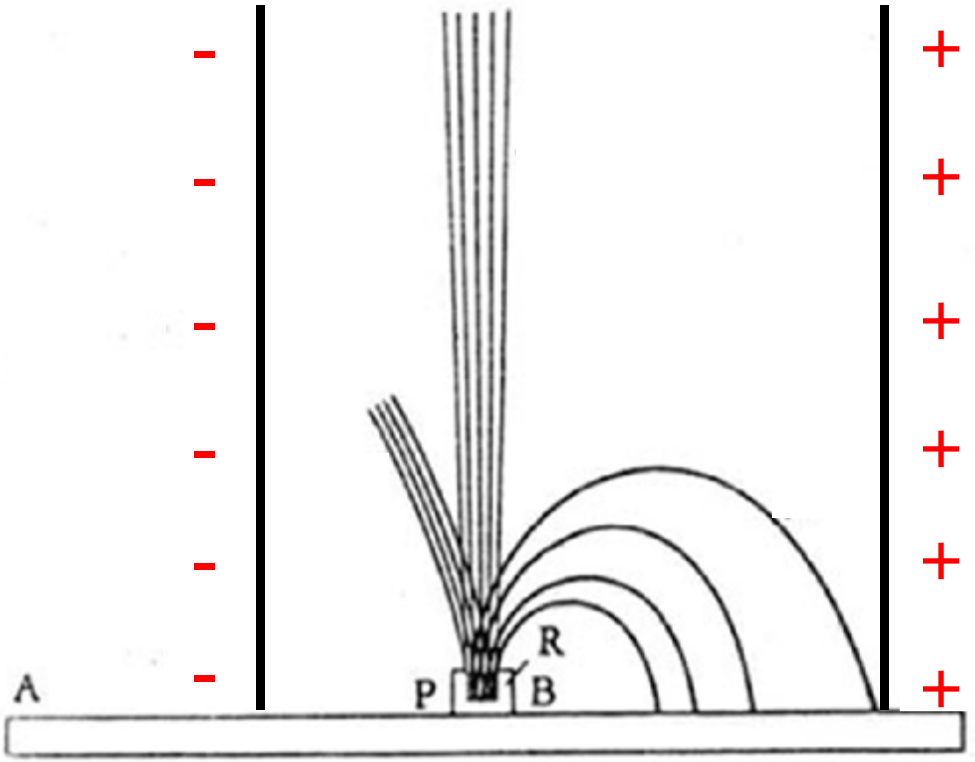
放射性现象

概念：像铀(U)、钋(Po)、镭(Ra)等元素能自发地放出一些人眼看不见的、能穿透黑纸使照相底片感光的射线，这些现象叫放射性现象。



放射性现象的发现把人们带入了原子核内部的世界。

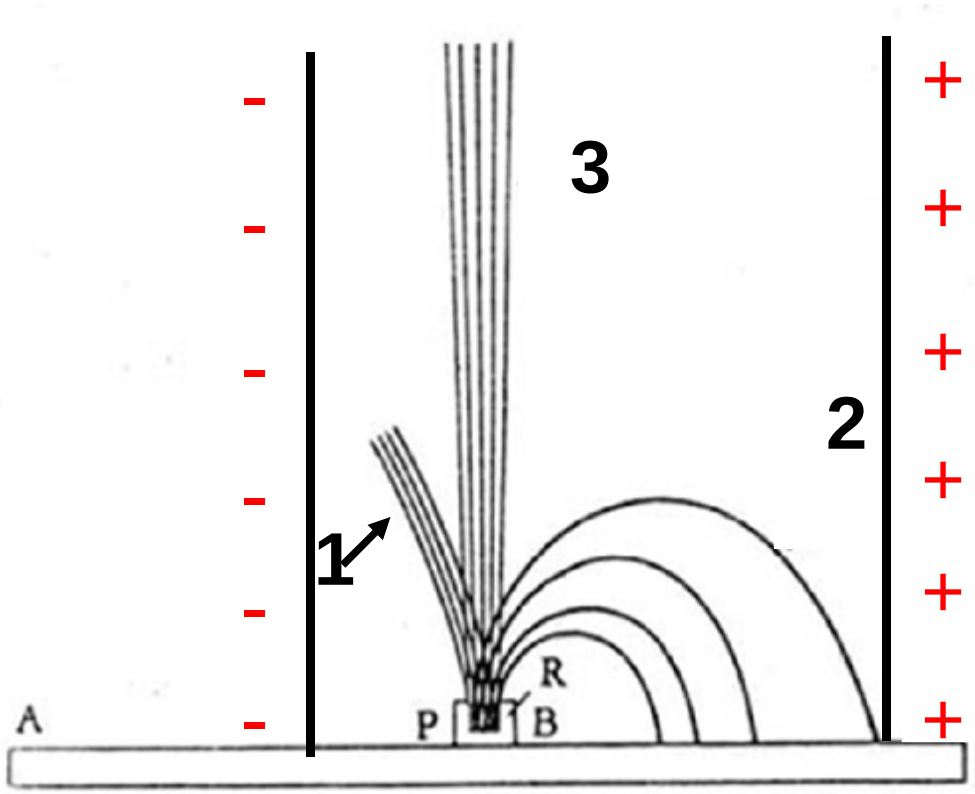




放射性物质

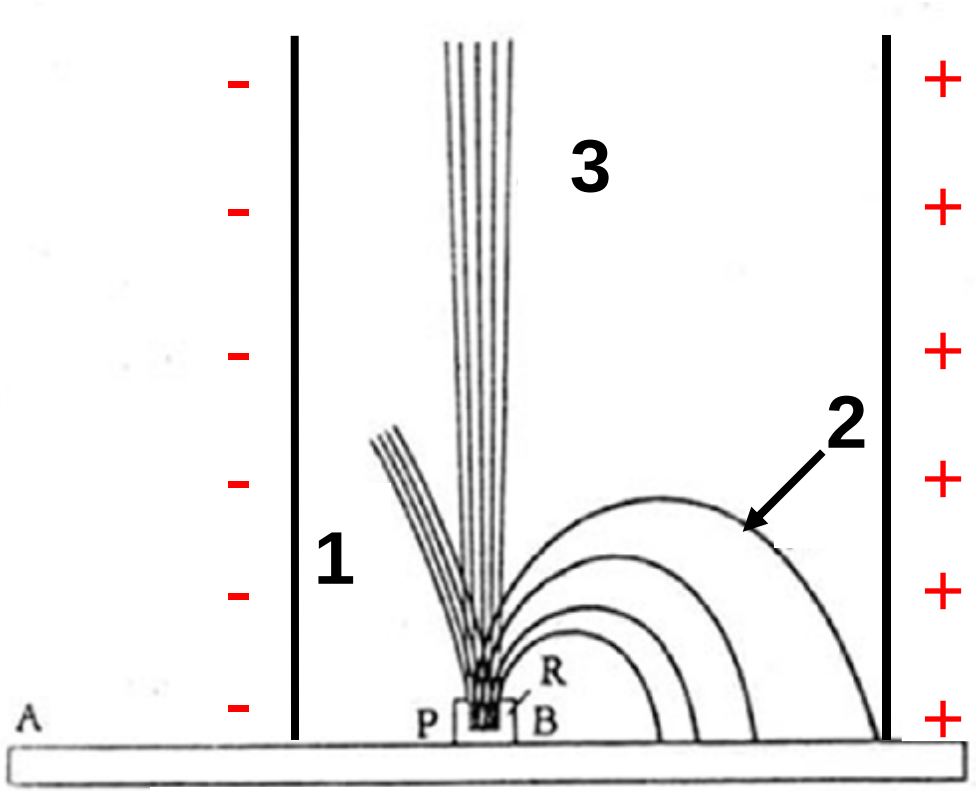
在磁场中射线分成三束

原子核放出的射线由两种带异种电荷的粒子和一种不带电的中性粒子组成。



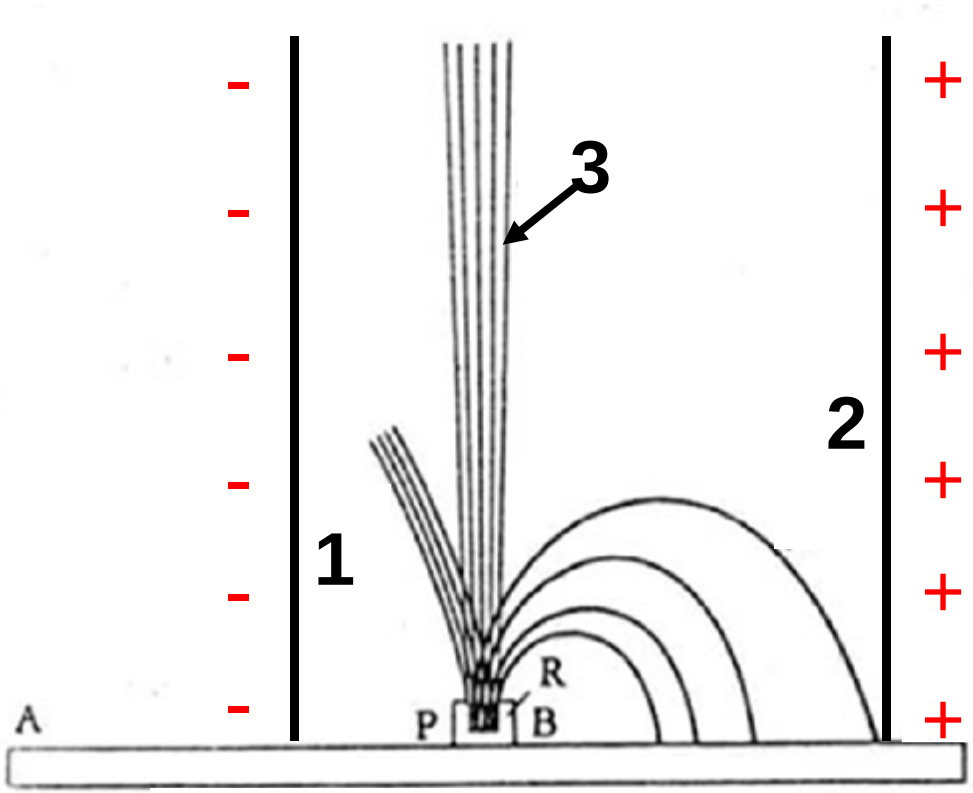
铅盒　放射性物质

1（α射线):高速运动的氦核流



铅盒　放射性物质

2 (β射线):高速运动的电子流



铅盒　放射性物质

3 (γ射线):一种电磁波

① 1919年，英国物理学家卢瑟福在做核反应实验时发现了质子；

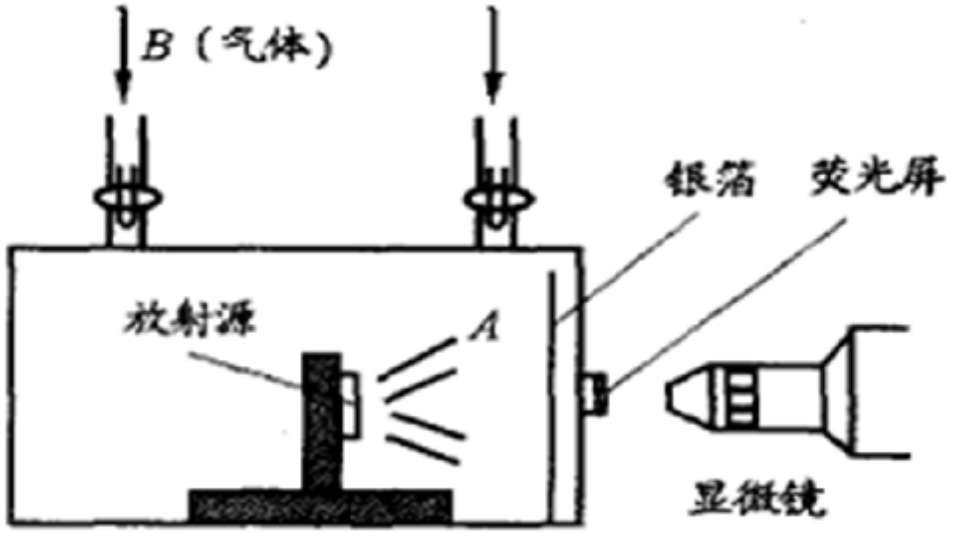
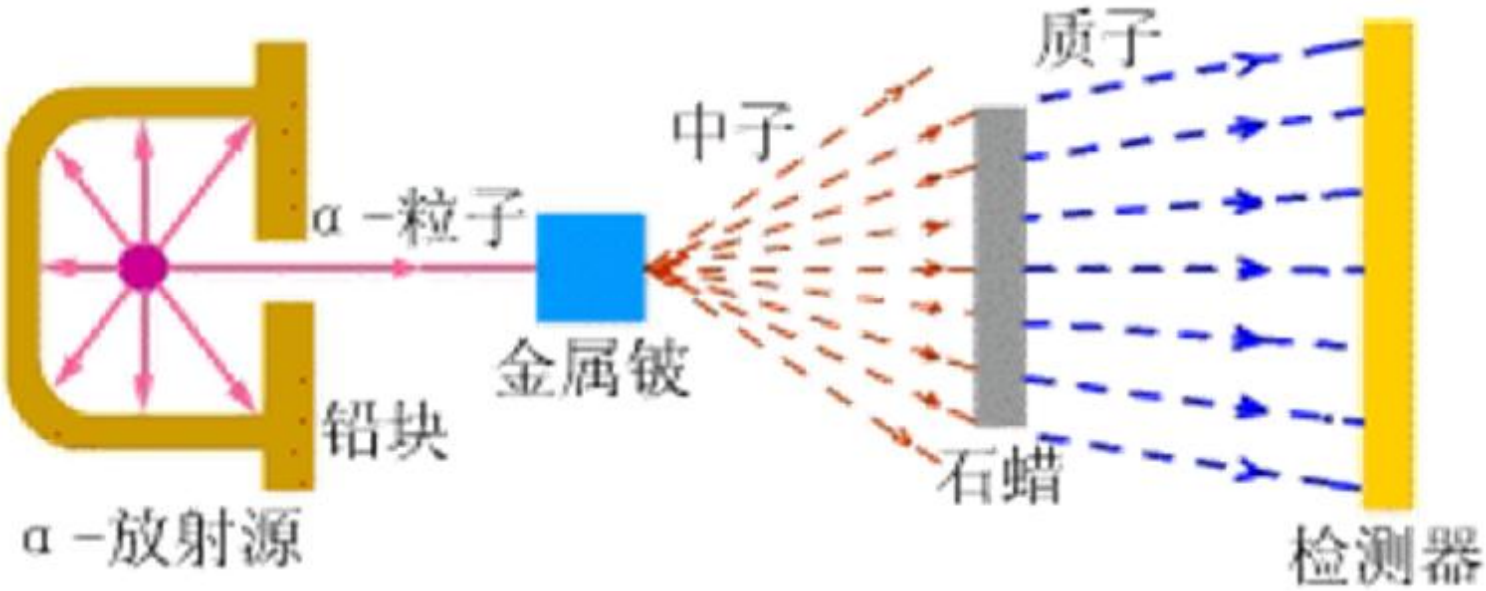
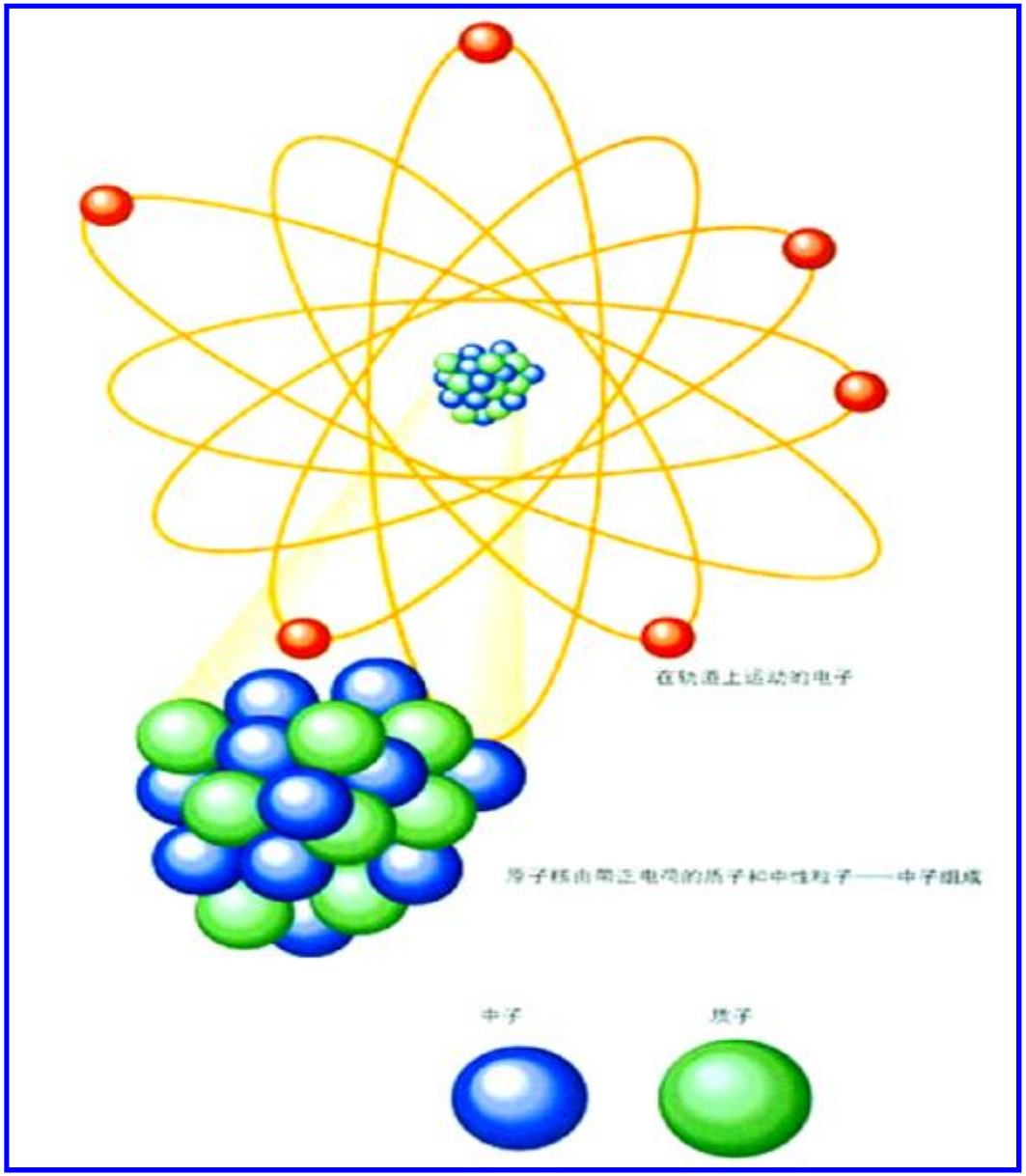


图 3

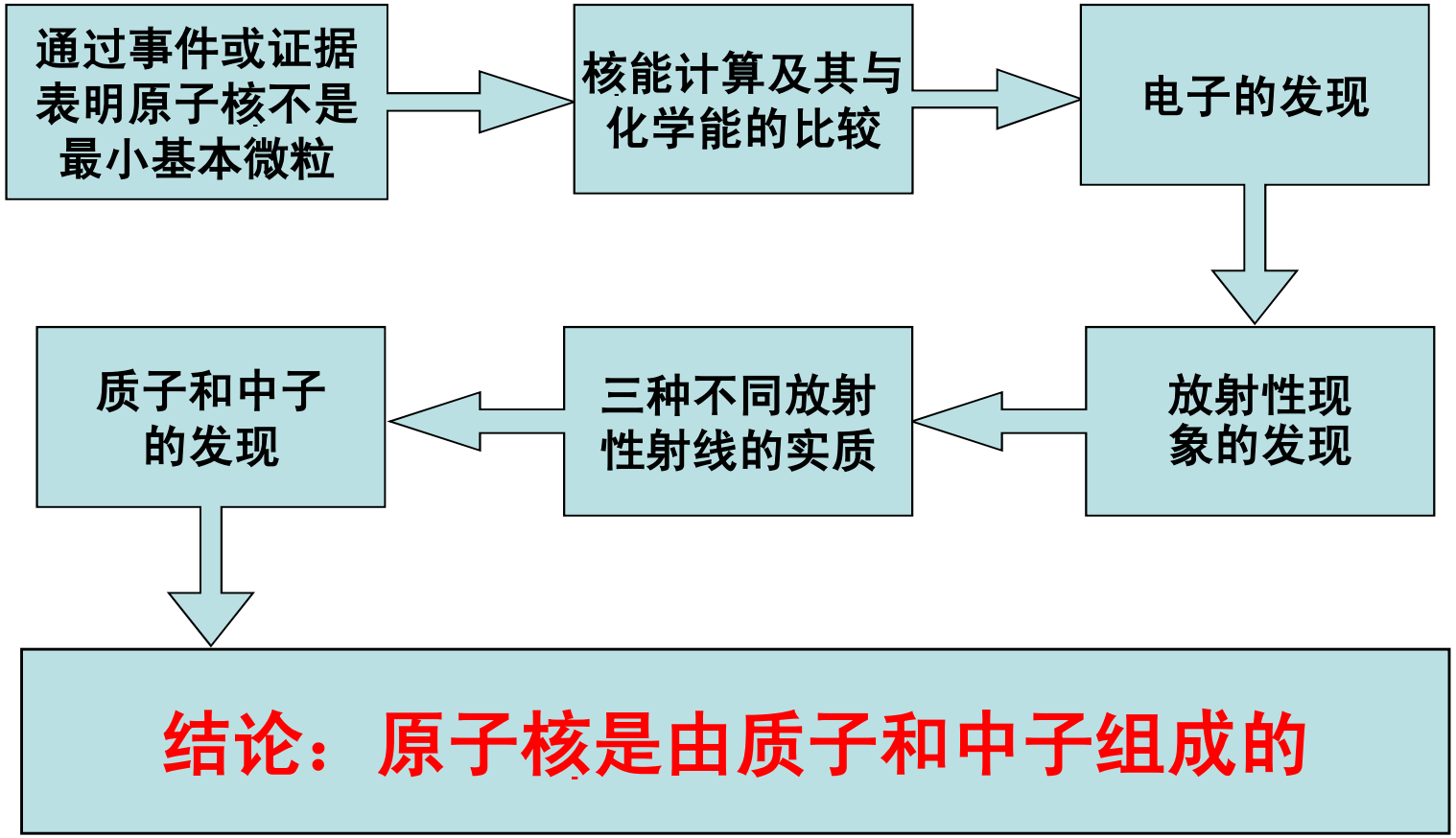
②1932年英国物理学家查德威克又发现了中子；



原子核是由质子和中子组成



小　　结


通过事件或证据表明原子核不是最小基本微粒
核能计算及其与化学能的比较
电子的发现
放射性现象的发现
三种不同放射性射线的实质
质子和中子的发现
结论：原子核是由质子和中子组成的

第2章　世界核工业的发展历程

1789年　M.H.Klaproth

分析沥青铀矿时发现92号元素

铀（Uranium）；

1841年　E.Peligot

制得金属铀；

1789年--1890年　只研究铀的一些主要化合物的物理化学性质，并只进行少量铀矿开采；

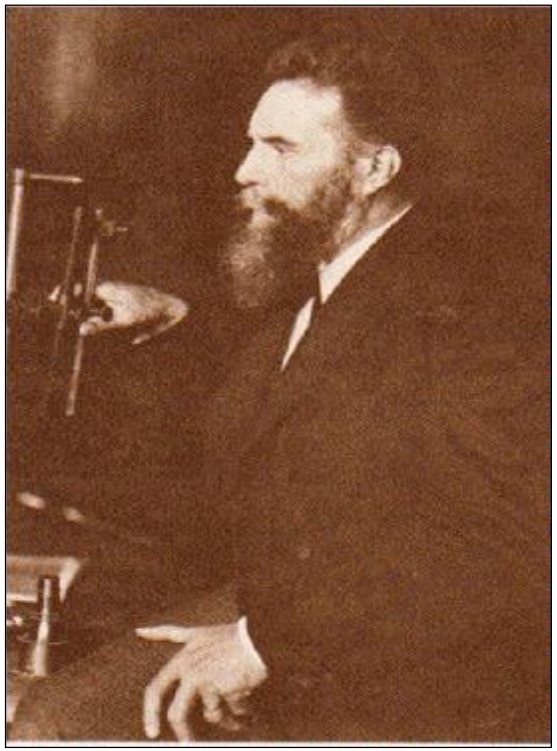
克拉普罗特，M. H.

W. Roentgen's discovery of x-rays

1895年末　德国物理学家

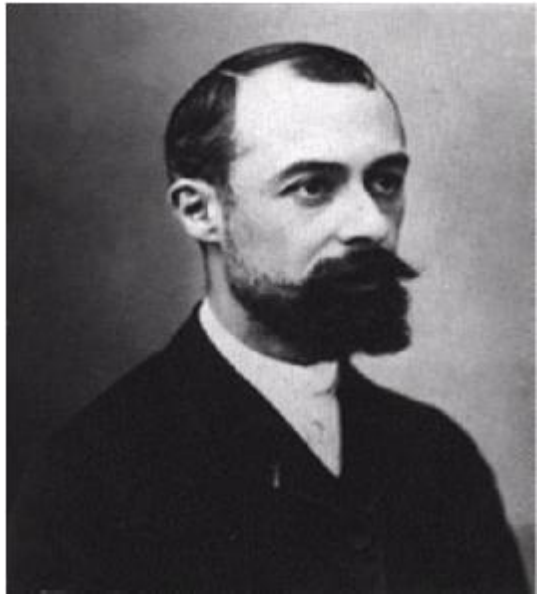
W. Roentgen

用Crookes管研究高压放电现象时注意到，当阴极电子束流轰击玻璃管壁时，观察到了荧光以及X射线



1896年H.Becquerel

发现U能自发地放射出某种看不见的穿透力极强的射线



1898年 M.S.Cure

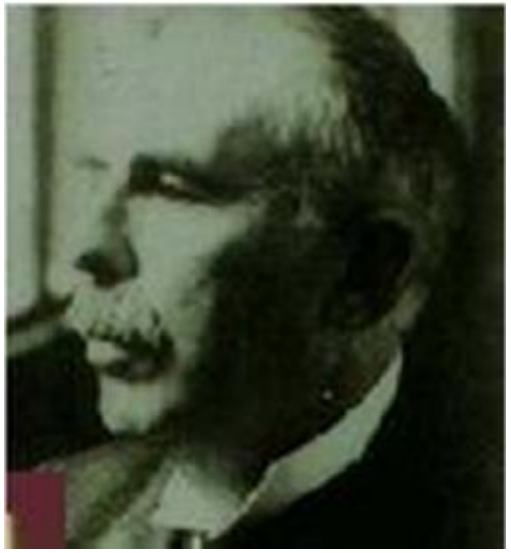
从沥青铀矿中又分离出放射性比U 更强的 $^{210}_{84}Po$ 和 $^{226}_{88}Ra$

1931年 伊伦娜•约里奥—居里

用Po所发射的α射线轰击Be时，可释放出穿透力很强的“射线”；

1932年 Chadwick

用实验证明Po—Be反应所得的“射线”即为中子。

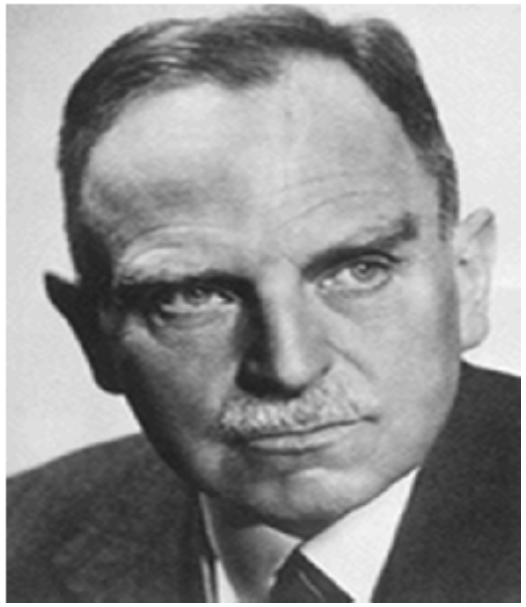


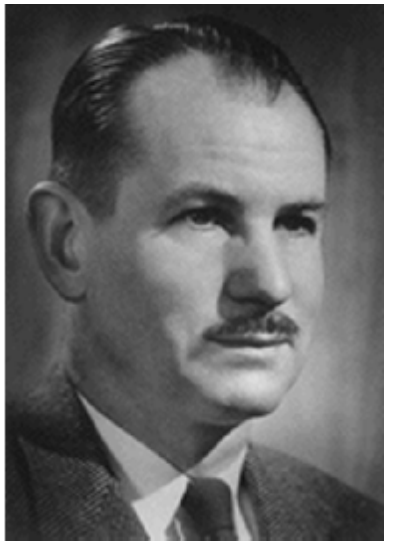
同年Szilard就提出有可能通过中子链式反应实现原子能释放，提出可能制造出原子弹的概念；

1934年 Szilard申请了原子弹方案的专利，Fermi用中子轰击铀，并发现将中子慢化后轰击效率更高。

1938年Otto Hahn 证明用中子轰击U的产物中有较轻的原子Ba；

1939年 Szilard 发现U裂变反应后，会产生多余的中子，Bohr 提出^{235}U和^{238}U 核行为不一样，同年7月，Szilard给Farmi写信提出可用石墨慢化铀栅来实现链式反应；





1941年 Seaborg

证实了94号元素的存在，分离出 $^{239}_{93}Np$，几天后衰变成 $^{239}_{94}Pu$，质量仅为0.25μg;

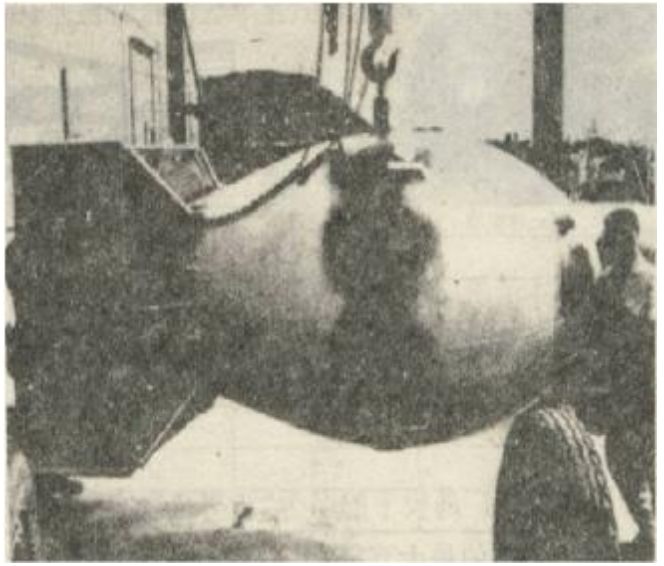
1942年　美国实行曼哈顿计划;

Farmi建成芝加哥1号堆（CP-1）

1943年　X—10堆达到临界，生产以克计的Pu;

1944年　Hanford 建成大规模生产Pu和分离Pu第一个堆;

1945年　　投放原子弹；



1945年以后

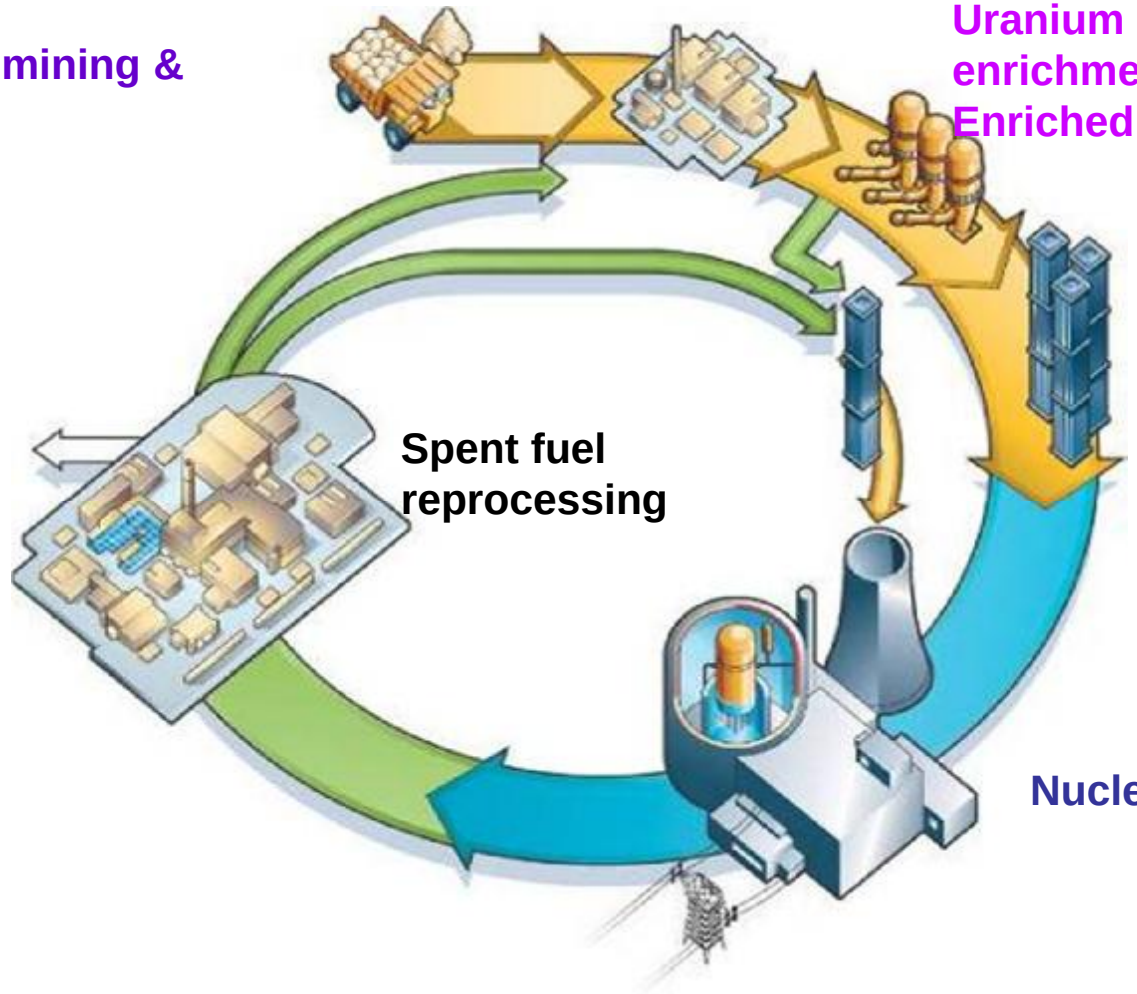
大力发展商用堆，建成核电站，并用发电，人们实现了可控的核裂变反应，驾驭了核能这匹烈马，使之造福于人类，成为现代能源的一个重要组成部分。

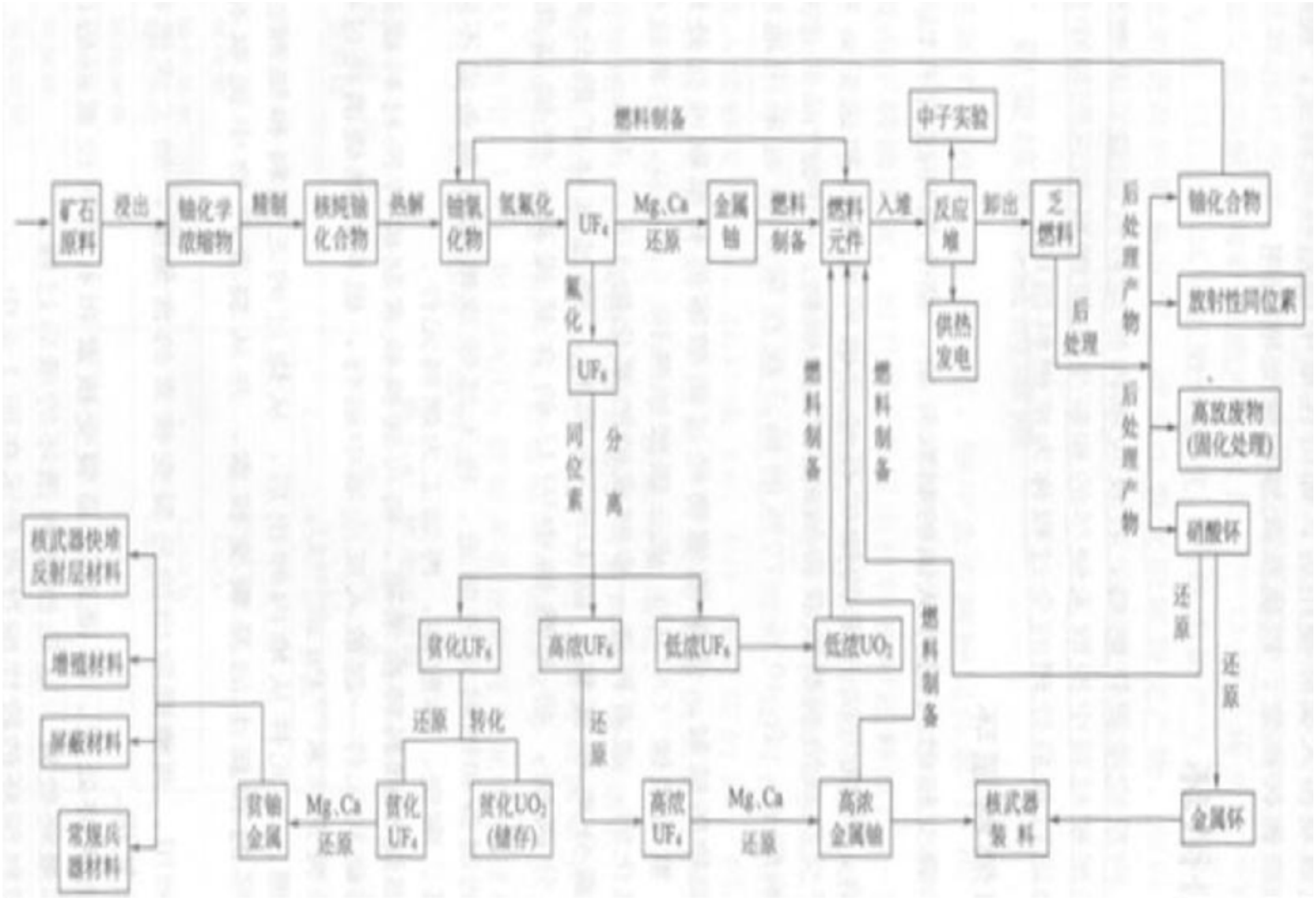
第3章 核燃料循环过程

3.1 概　念：

制备核燃料，向反应堆提供燃料，在反应堆内燃料释放能量，从燃烧过的乏燃料中或辐照过的增殖材料中提取未燃尽的和新生的核燃料在返回堆中使用，并将乏燃料剩余废物进行最后处置的全过程。

核燃料循环


Uranium mining & milling
Uranium enrichment, Enriched ^{235}U
^{239}Pu
Spent fuel reprocessing
Nuclear power plant


矿石原料
浸出
铀化学浓缩物
精制
核纯铀化合物
热解
铀氧化物
氢氟化
UF_4
Mg、Ca还原
金属铀
燃料制备
燃料元件
入堆
反应堆
卸出
乏燃料
后处理
后处理产物
铀化合物
放射性同位素
高放废物(固化处理)
硝酸钚
还原
还原
燃料制备
燃料制备
燃料制备
中子实验
供热发电
氟化
UF_6
同位素分离
贫化UF_6
高浓UF_6
低浓UF_6
低浓UO_2
核武器快堆反射层材料
增殖材料
屏蔽材料
常规兵器材料
贫铀金属
Mg、Ca还原
贫化UF_4
贫化UO_2(储存)
还原
转化
还原
高浓UF_4
Mg、Ca还原
高浓金属铀
核武器装料
金属钚

3.2 循环过程：

- 铀矿的采冶
- 铀化学浓缩物的精制
- 铀化合物的转化
- 铀的同位素分离和富集
- 核燃料材料的制备
- 燃料元件的制造
- 核燃料元件入堆“燃烧”
- 乏燃料后处理
- 乏燃料废物最终处置

中国核工业集团公司
拥有我国完整的核科技工业体系
铀转化
铀同位素分离
铀矿采冶
铀
核燃料元件制造
钚
铀矿勘查
核反应堆
乏燃料后处理
核废物处理与处置
中国核工业集团公司
产业布局图
核科研
核军工
核电产业
核地质
中核集团
铀矿冶
核燃料
核环保
其他

第4章 铀及铀的化合物

4.1 铀

$^{238}_{92}U$ $\left(^{234}_{92}U,0.0057\%;\ ^{235}_{92}U,0.7204\%;\ ^{238}_{92}U,99.2739\%\right)$

放射性：

^{235}U和 ^{238}U 衰变分别形成锕铀放射系和铀放射系

核特性：

$$^{238}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{239}_{92}U \xrightarrow{b^-} ^{239}_{93}Np \xrightarrow{b^-} ^{239}_{94}Pu$$

化学性质：

与 H_2, O_2, N_2, F_2, H_2O, HNO_3, H_2SO_4等反应

4.2 铀化合物

铀氧化物： UO_2 ， U_3O_8 ， UO_3

铀的卤化物：UF_4 ， UF_6 ， UCl_4

铀酰盐： $UO_2(NO_3)_2$ ， UO_2SO_4， UO_2CO_3

（$NH_4)_2U_2O_7$， $(NH_4)_4\ UO_2(CO_3)_3$

4.3 铀离子

U^{3+} , U^{4+} , UO_2^{+}, UO_2^{2+} (黄色)

第5章 铀矿的采冶

5.1 方 法

溶浸采矿

- 堆浸法
- 原地浸矿法
- 就地破碎浸矿法

工艺技术经多年实践，改革已日趋完善

已将多学科的最新成就紧密结合起来

溶浸采矿法发展快？

浸矿理论的研究推动了生产工艺的发展

生产成本低

5.2 铀浸出的化学机理

5.2.1 酸法浸出

$$UO_3 + H_2SO_4 \rightarrow UO_2SO_4 + H_2O$$

$$U_3O_8 + {}^1/_2O_2 + 3H_2SO_4 \rightarrow 3UO_2SO_4 + 3H_2O$$

$$UO_2SO_4 + SO_4^{2-} \leftrightarrow [UO_2(SO_4)_2]^{2-}$$

$$[UO_2(SO_4)_2]^{2-} + SO_4^{2-} \leftrightarrow [UO_2(SO_4)_3]^{4-}$$

5.2.2 碱法浸出

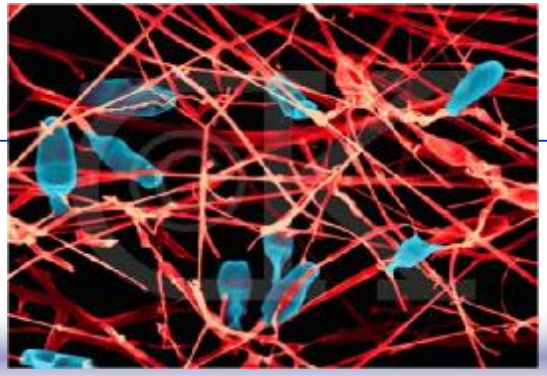
$$UO_3 + 3Na_2CO_3 + H_2O = Na_4[UO_2(CO_3)_3]$$

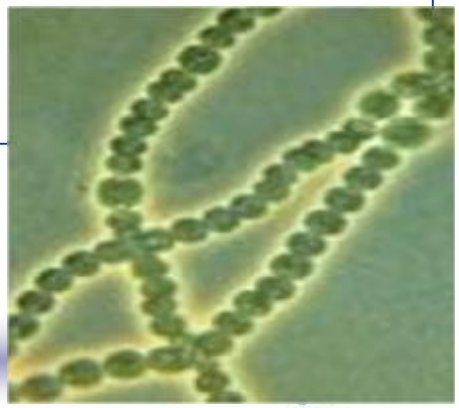
$$U_3O_8 + 9Na_2CO_3 + {}^1/_2O_2 + 3H_2O = Na_4[UO_2(CO_3)_3] + 6NaOH$$

$$UO_2 + 3Na_2CO_3 + {}^1/_2O + H_2O = Na_4[UO_2(CO_3)_3] + 2NaOH$$

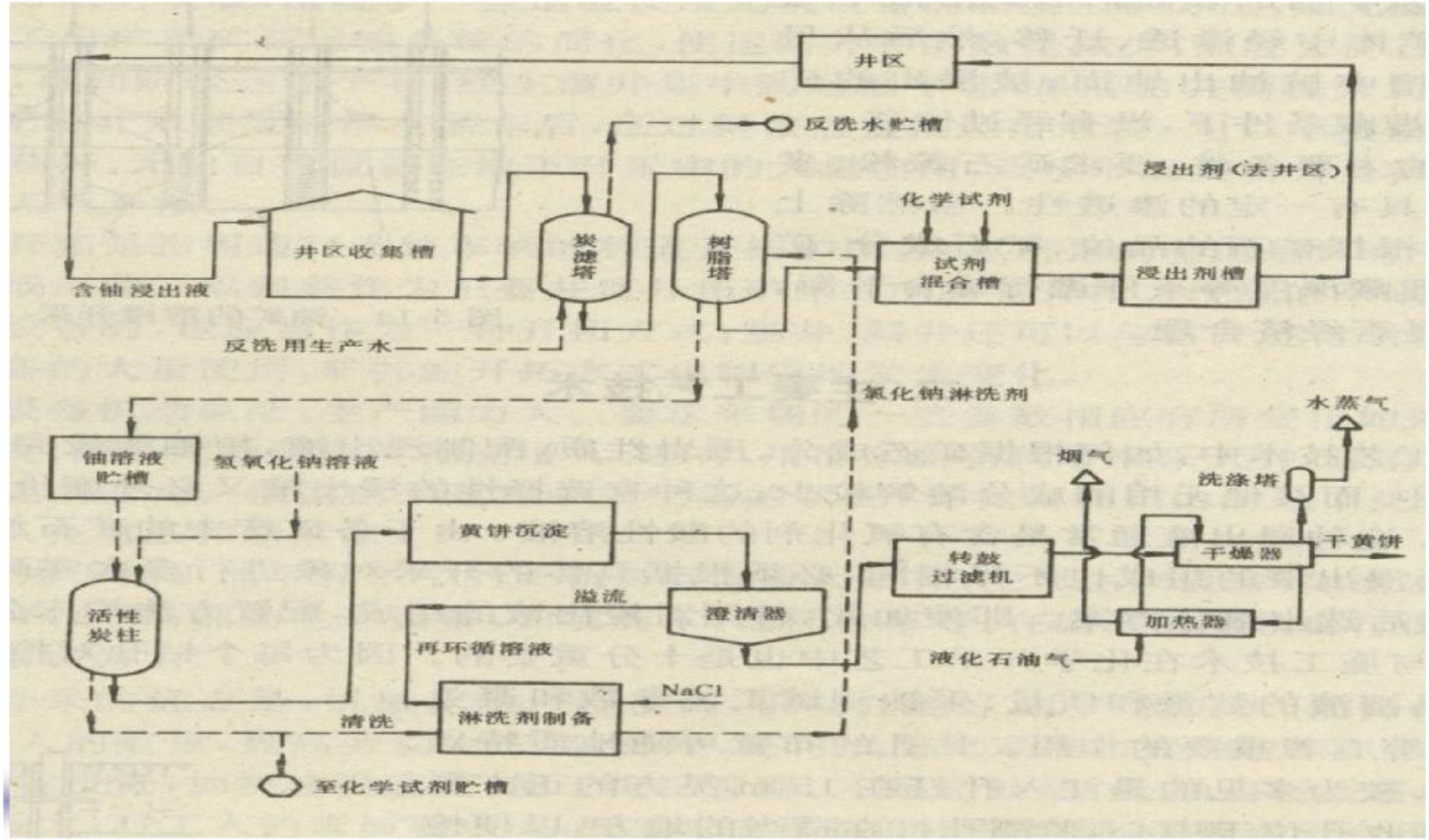
5.2.3 细菌浸出

利用细菌的生物化学作用，选择性的将铀矿物浸出来的一种方法。浸矿用的细菌是铀矿山的酸性矿坑水中自发生长的一种单细胞微生物，从矿水中挑选种菌，通过适宜的培养基培殖，然后把它加入到溶浸中浸矿。在生产实际应用最多的是：氧化硫硫杆菌、氧化亚铁硫杆菌，氧化亚铁铁杆菌。

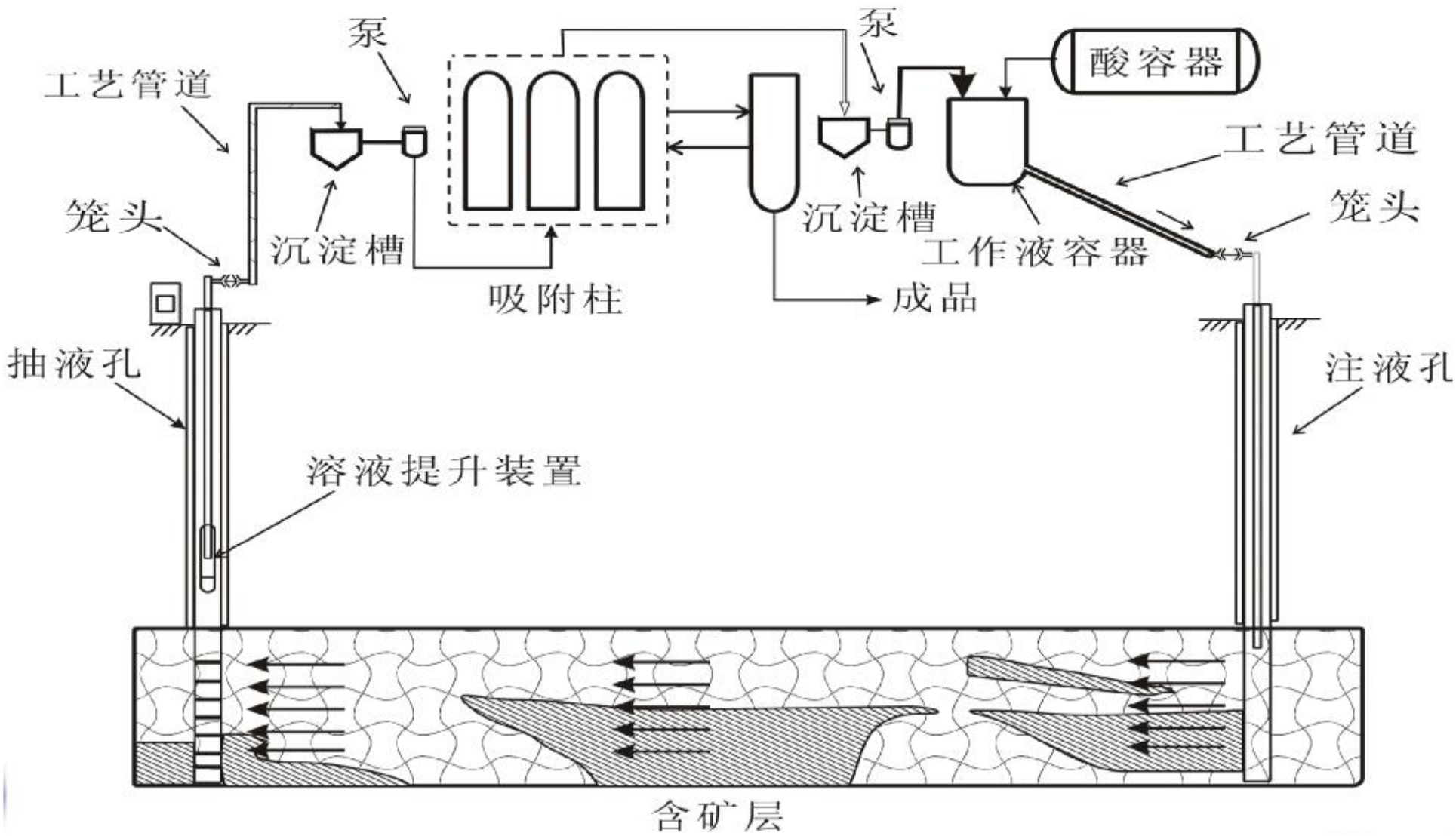




5.3 溶浸采铀的工艺流程



5.4 地浸采铀工艺原理示意图

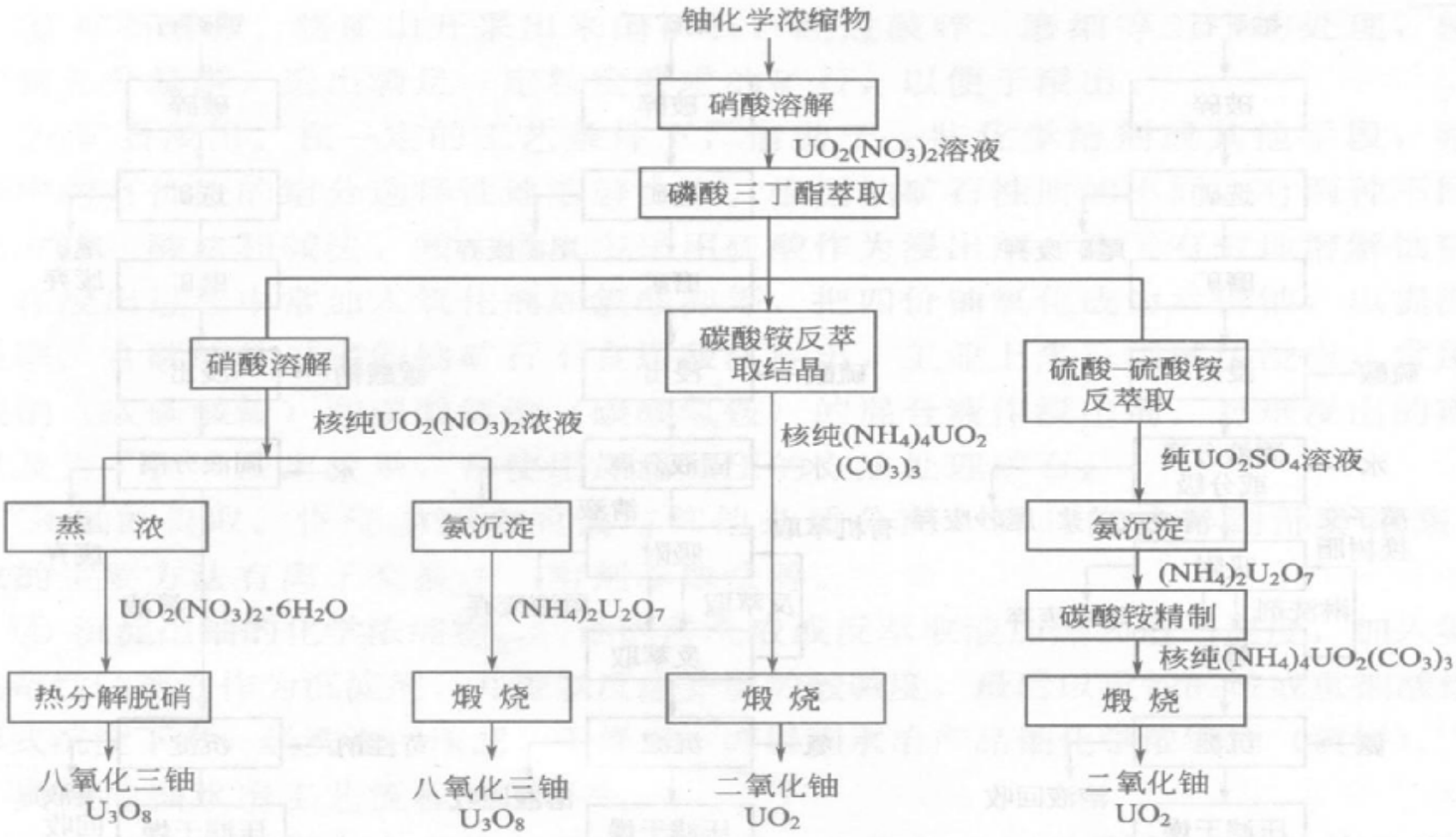


第6章 铀化学浓缩物的精制（纯化）

6.1 过 程

铀化学浓缩物经过HNO_3溶解和磷酸三丁酯（TBP）萃取纯化处理，得到核用的$UO_2(NO_3)_2$、$(NH_4)_2U_2O_7$(ADU)或$(NH_4)_4UO_2(CO_3)_3$(AUC)，再将这些化合物煅烧热解成铀的氧化物，或再进一步制成铀的氟化物：UF_4/UF_6或金属铀

6.2 工艺流程



几种典型的铀精制工艺流程

第7章 铀化合物的转化

7.1 UF_4/UF_6的制备

$UO_3+H_2 \rightarrow UO_2+H_2O$ / $U_3O_8+2H_2$

$\rightarrow 3UO_2+2H_2O$

$UO_2+4HF \rightarrow UF_4+2H_2O$

$UF_4+F_2 \rightarrow UF_6$

7.2 国外从铀矿石直接制备UF_6方法

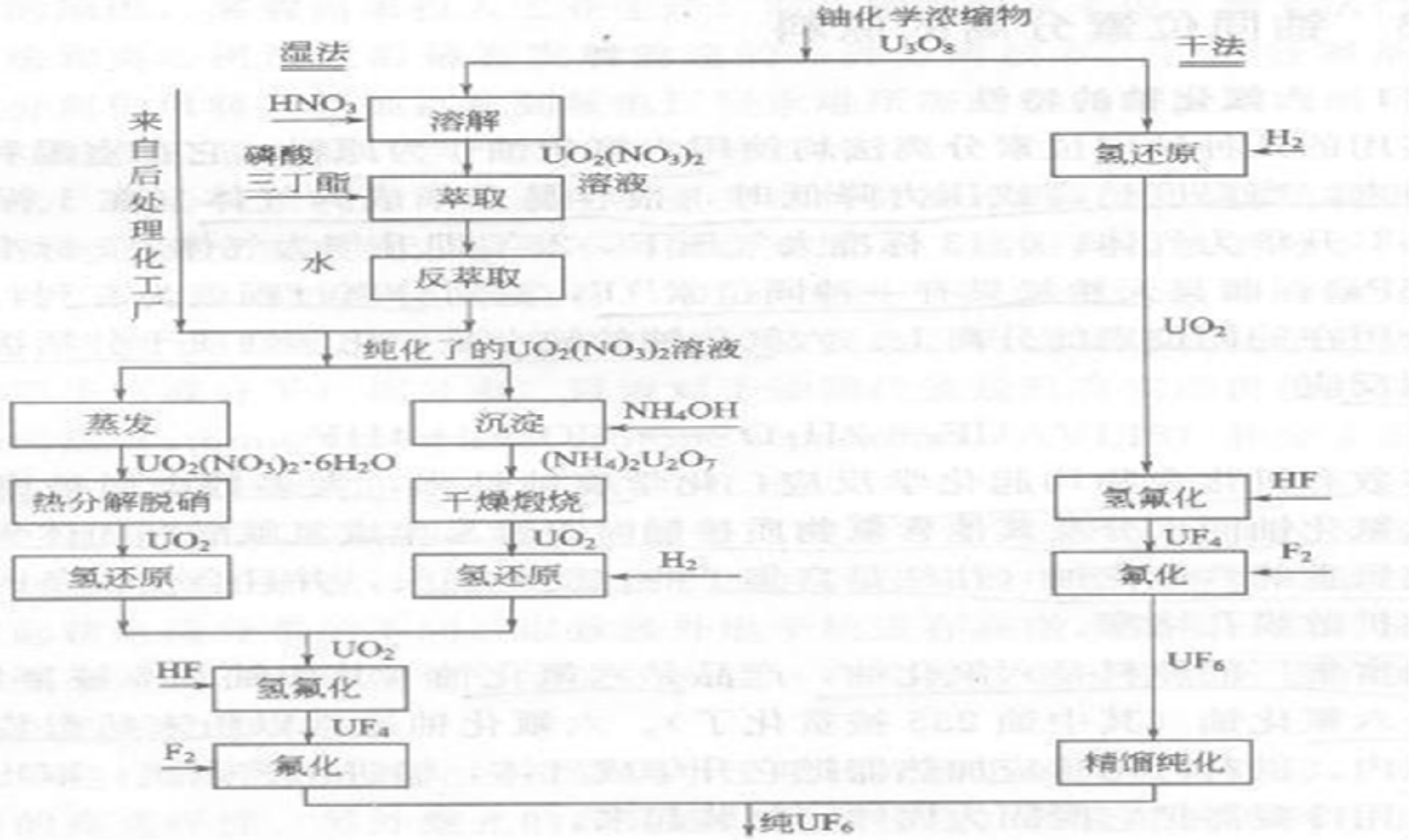
将铀矿石浸出液浓缩到3g（U）/L UO_2SO_4溶液加入萃取柱，用胺类的煤油溶液萃取铀，用8mol盐酸反萃取，将已形成的UO_2SO_4络合物转化成氯化铀酰络合物溶液，电解，将UCl_4加热到90°C，UCl_4与HF（L） 反应生成UF_4水合物沉淀（绿饼），用F_2进一步氟化，得到UF_6。

7.3 方 法

干 法

湿 法

其工艺流程图是：

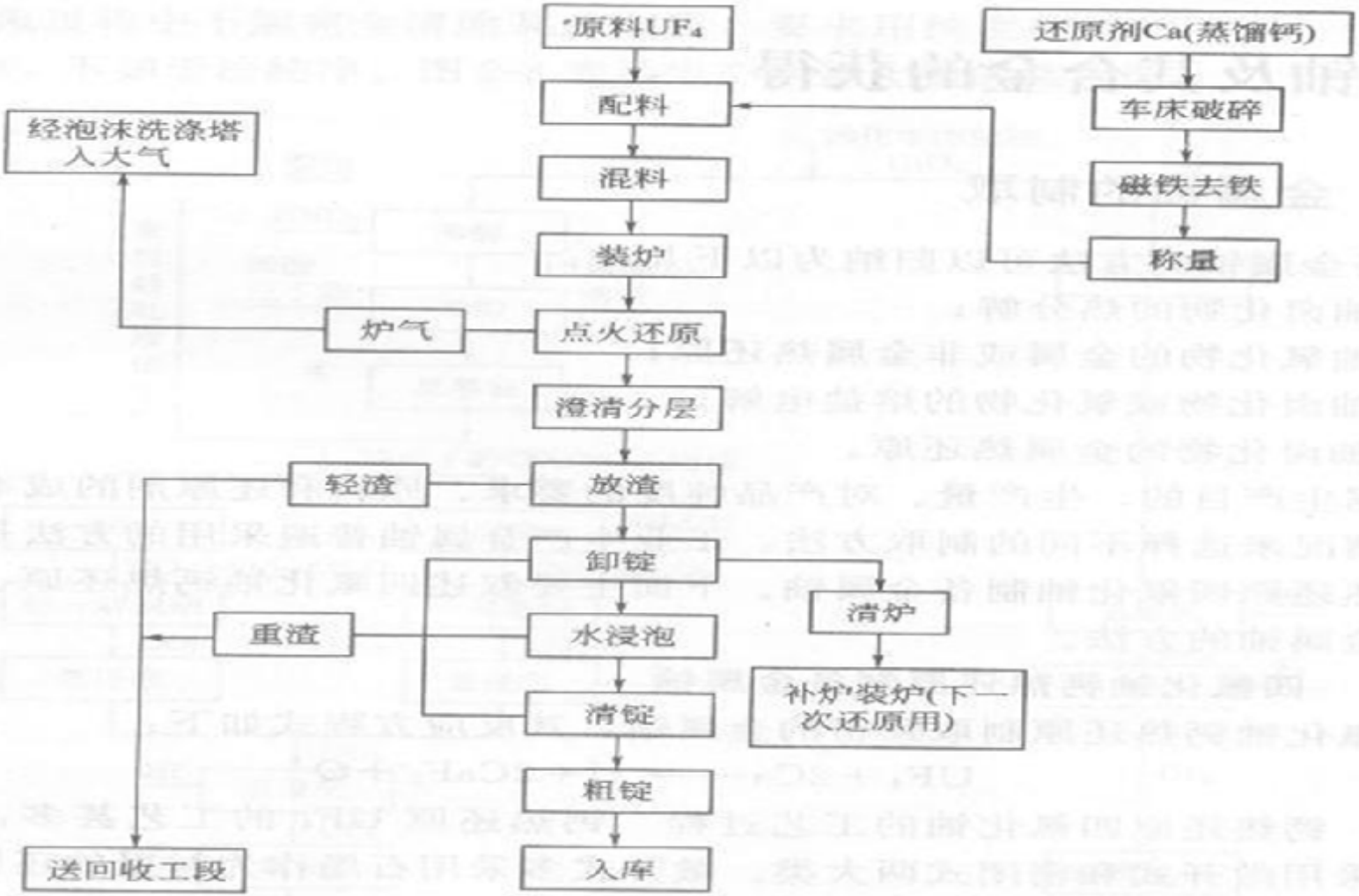

铀化学浓缩物
U_3O_8
湿法
干法
HNO_3
溶解
磷酸
三丁酯
萃取
$UO_2(NO_3)_2$
溶液
水
反萃取
来自后处理化工厂
纯化了的$UO_2(NO_3)_2$溶液
蒸发
沉淀
NH_4OH
$UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$
$(NH_4)_2U_2O_7$
热分解脱硝
干燥煅烧
UO_2
UO_2
氢还原
氢还原
H_2
UO_2
HF
氢氟化
UF_4
F_2
氟化
纯UF_6
氢还原
H_2
UO_2
氢氟化
HF
UF_4
氟化
F_2
UF_6
精馏纯化

7.4 金属铀的制取

7.4.1 原　理

$$UF_4+2Ca(Mg)\rightarrow U+Ca(Mg)F_2$$

7.4.2 工艺流程


原料UF_4
还原剂Ca(蒸馏钙)
配料
车床破碎
混料
磁铁去铁
装炉
称量
经泡沫洗涤塔入大气
炉气
点火还原
澄清分层
轻渣
放渣
卸锭
清炉
重渣
水浸泡
清锭
补炉装炉(下一次还原用)
粗锭
送回收工段
入库

第8章 铀的同位素分离与富集

8.1 目 的

^{235}U是三种易裂变核素(^{235}U、^{239}Pu、^{233}U)中唯一天然存在的，它在天然铀中的丰度为0.7204%，而各种反应堆中使用的铀燃料，其中^{235}U的丰度大于0.7204%，把天然铀同位素混合物(^{234}U、^{235}U、^{238}U)经同位素分离，提高^{235}U的含量，以满足各种反应堆对^{235}U含量的要求。

8.2 为什么要使用浓缩铀作为燃料？

8.2.1 铀浓缩

在核工业核燃料生产中，采用同位素分离的方法，将天然铀或铀同位素混合物中^{235}U的含量提高到高于天然铀的不同程度，以满足不同的需要，^{235}U的最高含量可达到93.5%，这一分离过程称为铀浓缩或富集。

8.2.2 浓缩铀分类

低浓缩铀　（0.71%<^{235}U<5%）

中浓缩铀　（5%<^{235}U<80%）

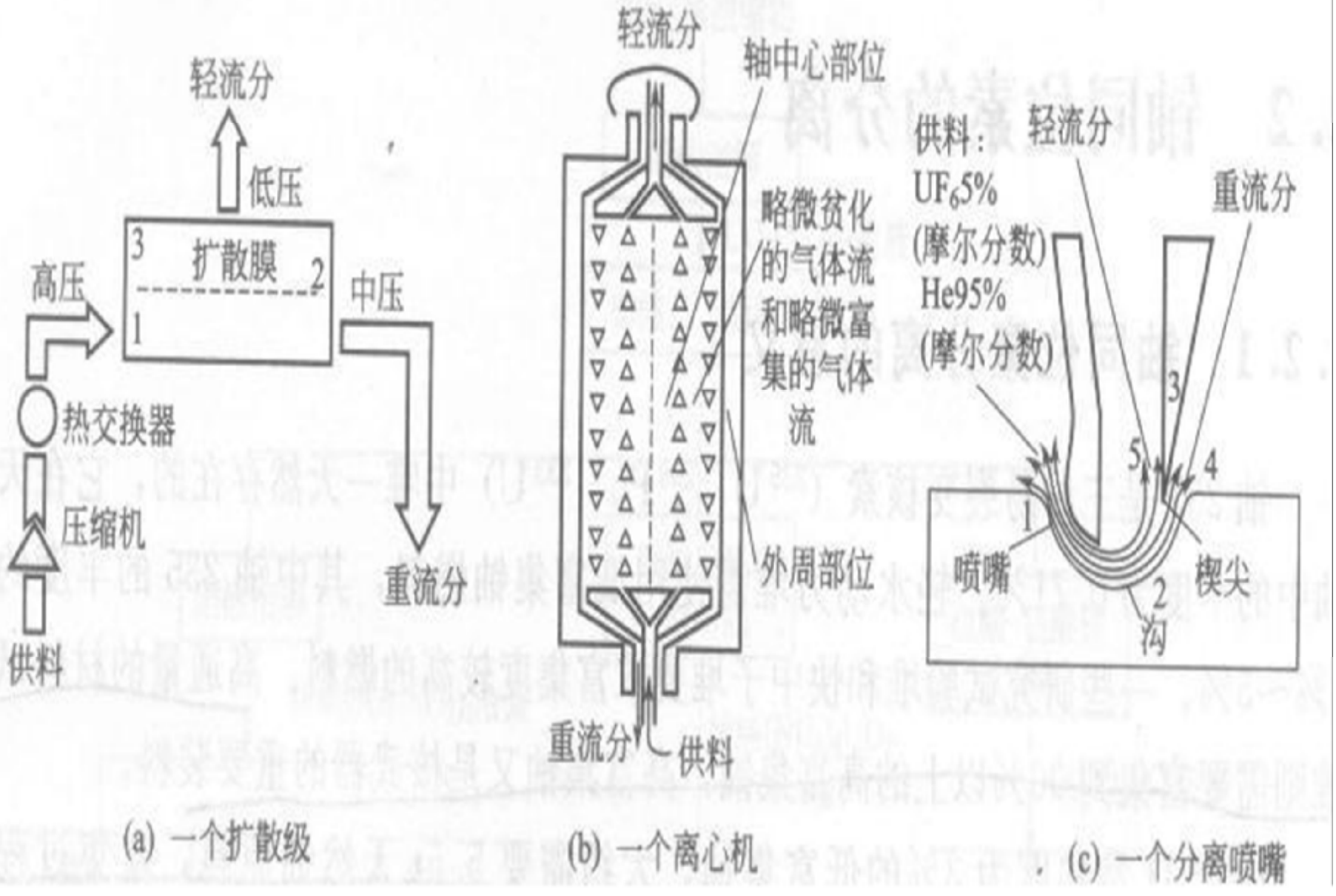
高浓缩铀　（^{235}U>80%）

8.2.3 使用高浓缩铀作为燃料的目的

提高燃料中易裂变核素的含量，增加燃耗的深度，降低核燃料临界体积和临界质量，从而减少堆芯活性区体积，使堆芯紧凑，同时，使用浓缩铀可减少燃料元件制造，储运量，减少乏燃料的后处理量。

8.3 方 法

- 气体扩散法
- 离心法
- 喷嘴法
- 激光分离法
- 化学交换法
- 电磁分离法
- 等离子体法



(a) 一个扩散级　　(b) 一个离心机　　(c) 一个分离喷嘴

8.3.1 气体扩散法

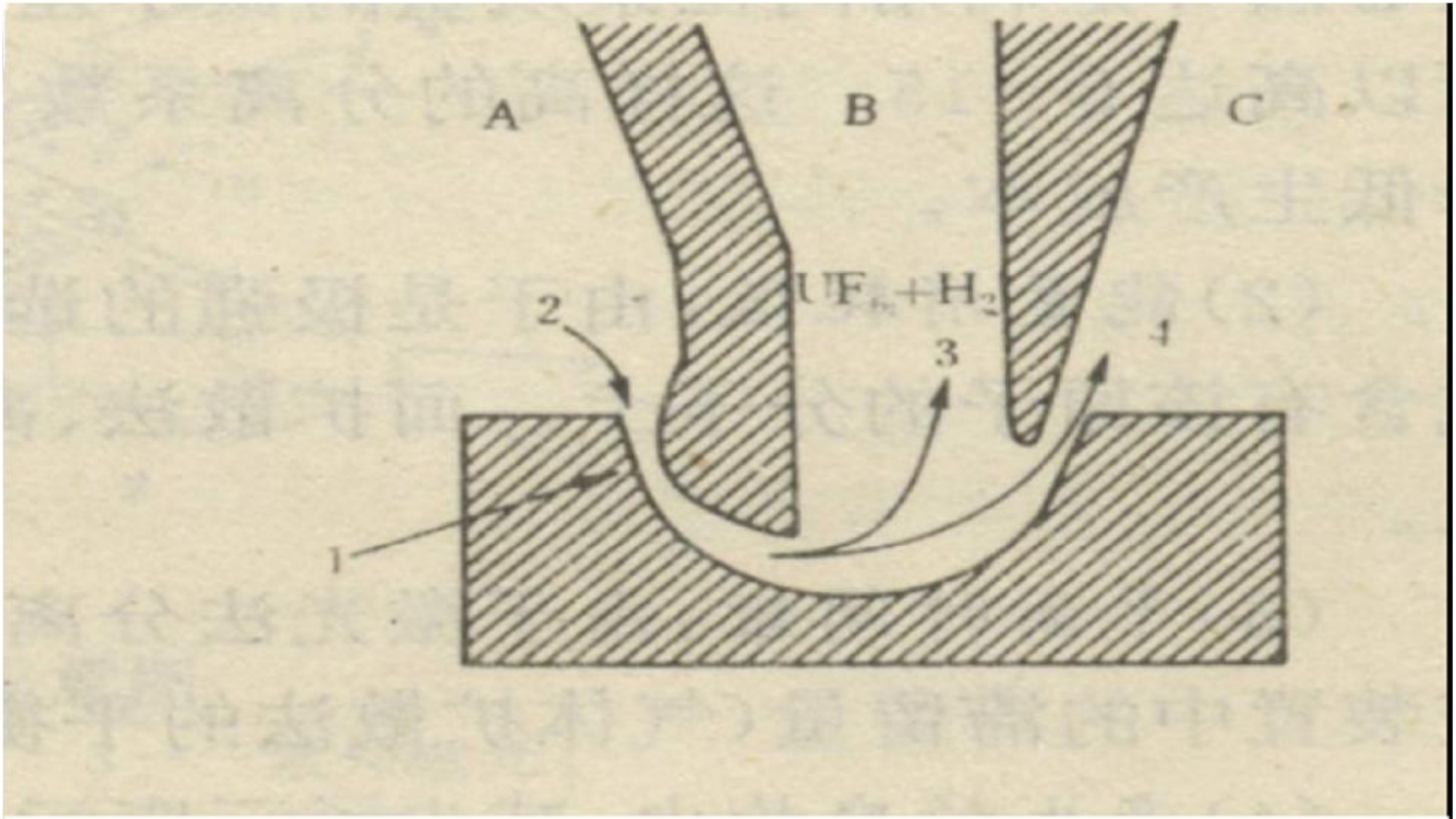
基于两种不同分子量的气体混合物在热运动平衡时，两种分子具有相同的平均动能，而速度不同，将 $^{235}UF_6$ 和 $^{238}UF_6$ 分离。

8.3.2 离心机法

在变速旋转的离心机中，由于很强的离心力场的作用，较重的分子靠近外周富集，较轻的分子靠近轴线富集，从外周和中心分别引出两股气体流，从而实现 $^{235}UF_6$ 和 $^{238}UF_6$ 的分离。

8.3.3 喷嘴法

用大量 He气或 H_2气同 UF_6气体混合成为工作气流，使之通过狭缝喷嘴而膨胀，在膨胀过程中加速到超声速的气流顺着喷嘴凹的曲面壁弯转，较重分子靠近壁面富集，较轻分子远离壁面富集，从而实现 $^{235}UF_6$ 和 $^{238}UF_6$ 分离 。



1——喷嘴，　　2——UF_6(5%)+He(95%)

3——浓缩$^{235}UF_6$，4——$^{238}UF_6$。

第9章　核燃料材料的制备

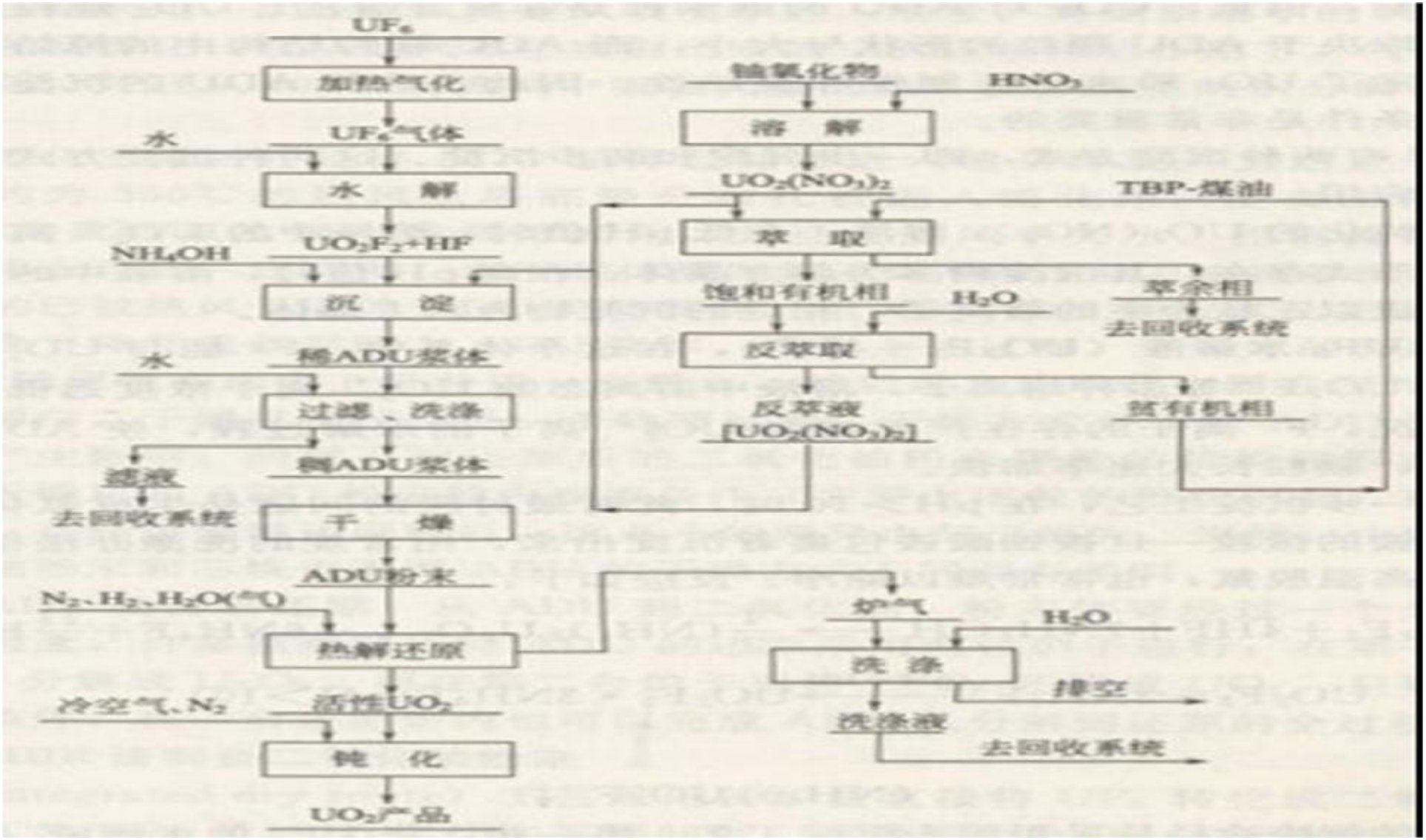
9.1 芯体材料的制造

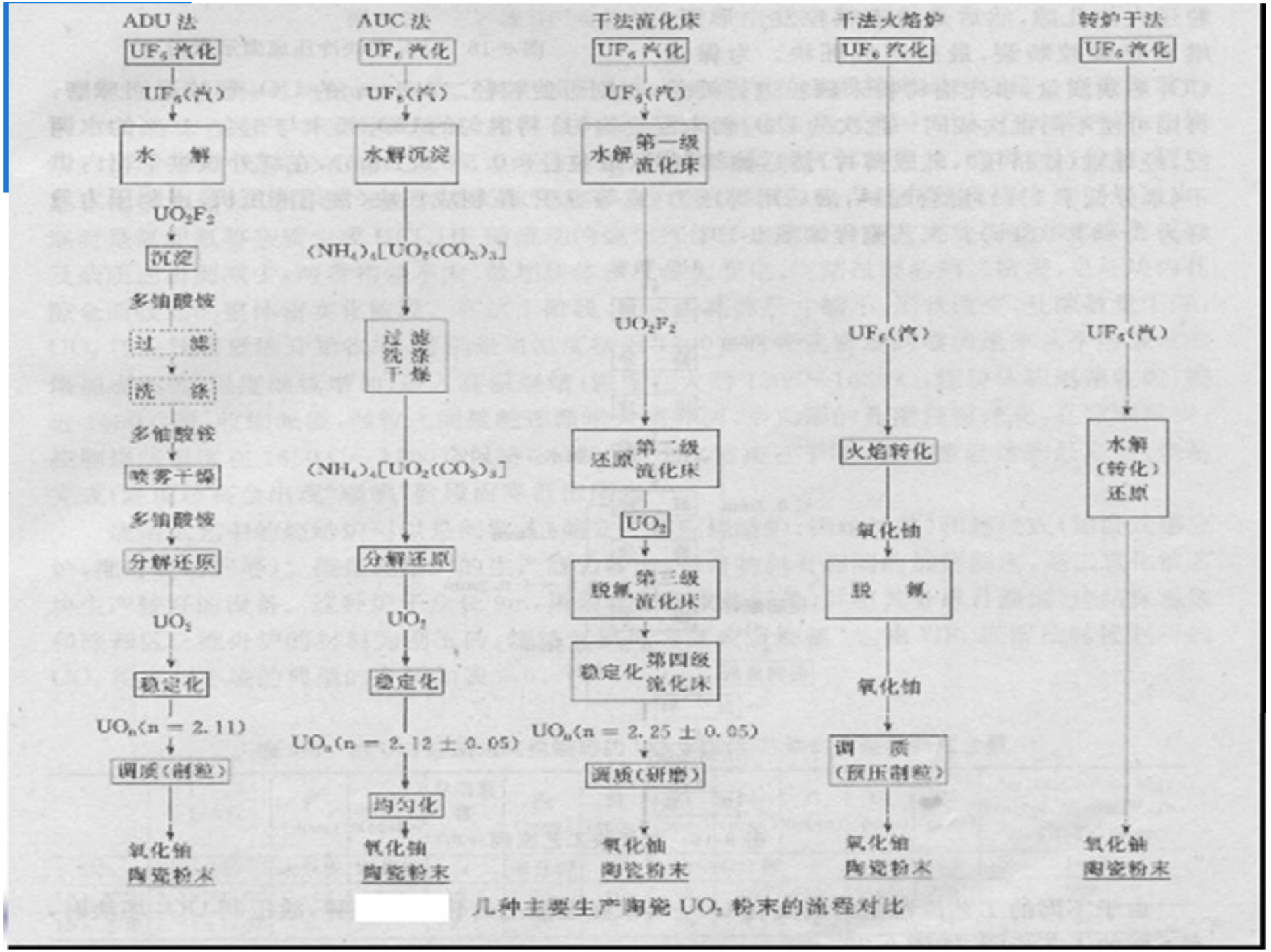
- 金属型燃料
- 弥散型燃料
- 陶瓷型燃料

9.2 包壳燃料

Al及合金、Mg及合金 、Zr及合金、不锈钢、石墨、Ni 、Be、Nb、V等

9.3 UO_2粉末及芯块的制造





几种主要生产陶瓷 UO_2 粉末的流程对比

第10章　核燃料元件的制造

10.1 类型

1、　按用途分类：

钚生产堆元件

实验研究堆元件

动力堆元件

快中子增殖堆元件

2、　从反应堆使用的冷却剂对元件分类：

石墨堆元件

轻水堆元件

重水堆元件

压水堆元件

高温气冷堆元件

3、　按核燃料芯体材料分类：

金属型元件

陶瓷型元件

弥散型元件

4、　按元件结构及几何形状分类：

棒状元件

管状元件

同心套管元件

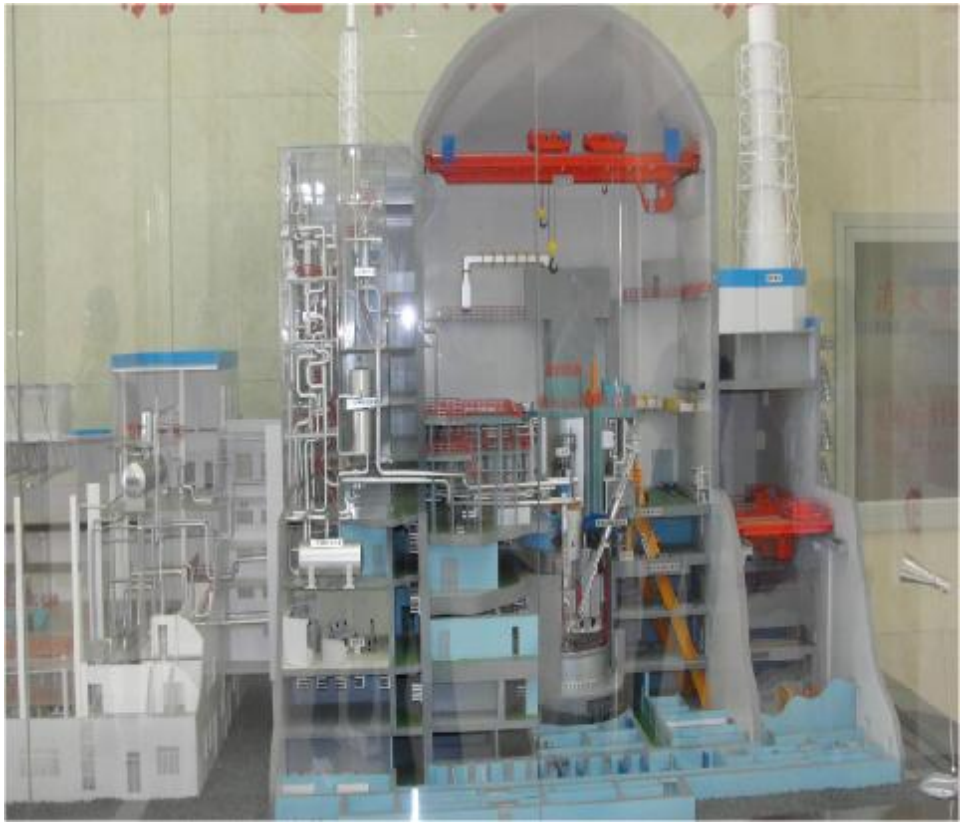
板状元件

球形元件

10.2 结 构

不同类型的核燃料元件其结构不一样，下面就几种常用的核燃料元件的结构叙述如下：

- 气冷堆
- 生产堆
- 水冷动力堆
  - 轻水堆
  - 重水堆
- 研究试验堆
- 快中子增殖堆燃料原件



进核能系统优
家已将其作为
中国实验快堆
优开始预先研
十一五”建

MW，采用钠-
构，冷却剂
逐步过渡到
16个，建筑

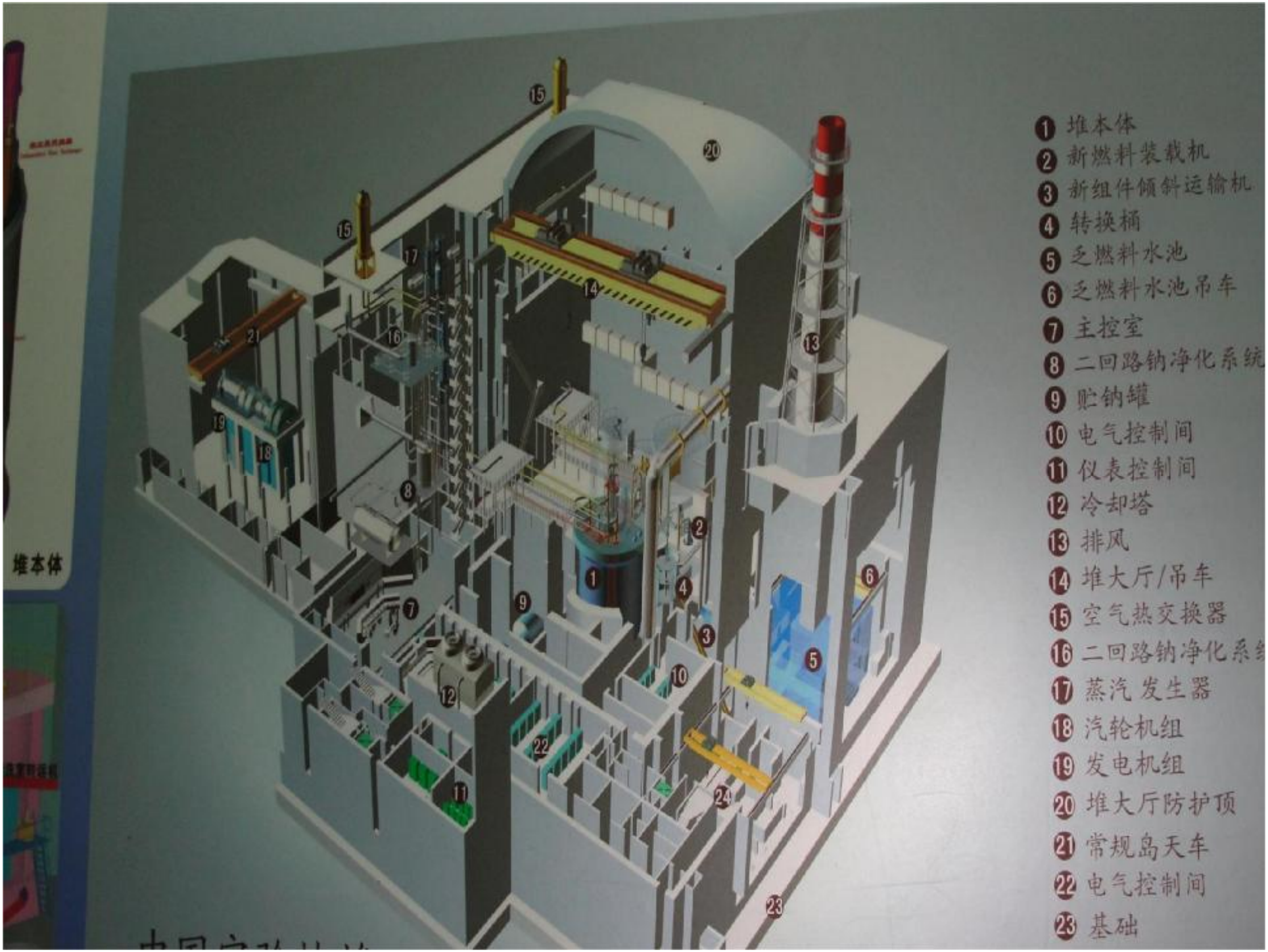
按照“建立
目标，联合
合作基础上
力，使我
权，形成

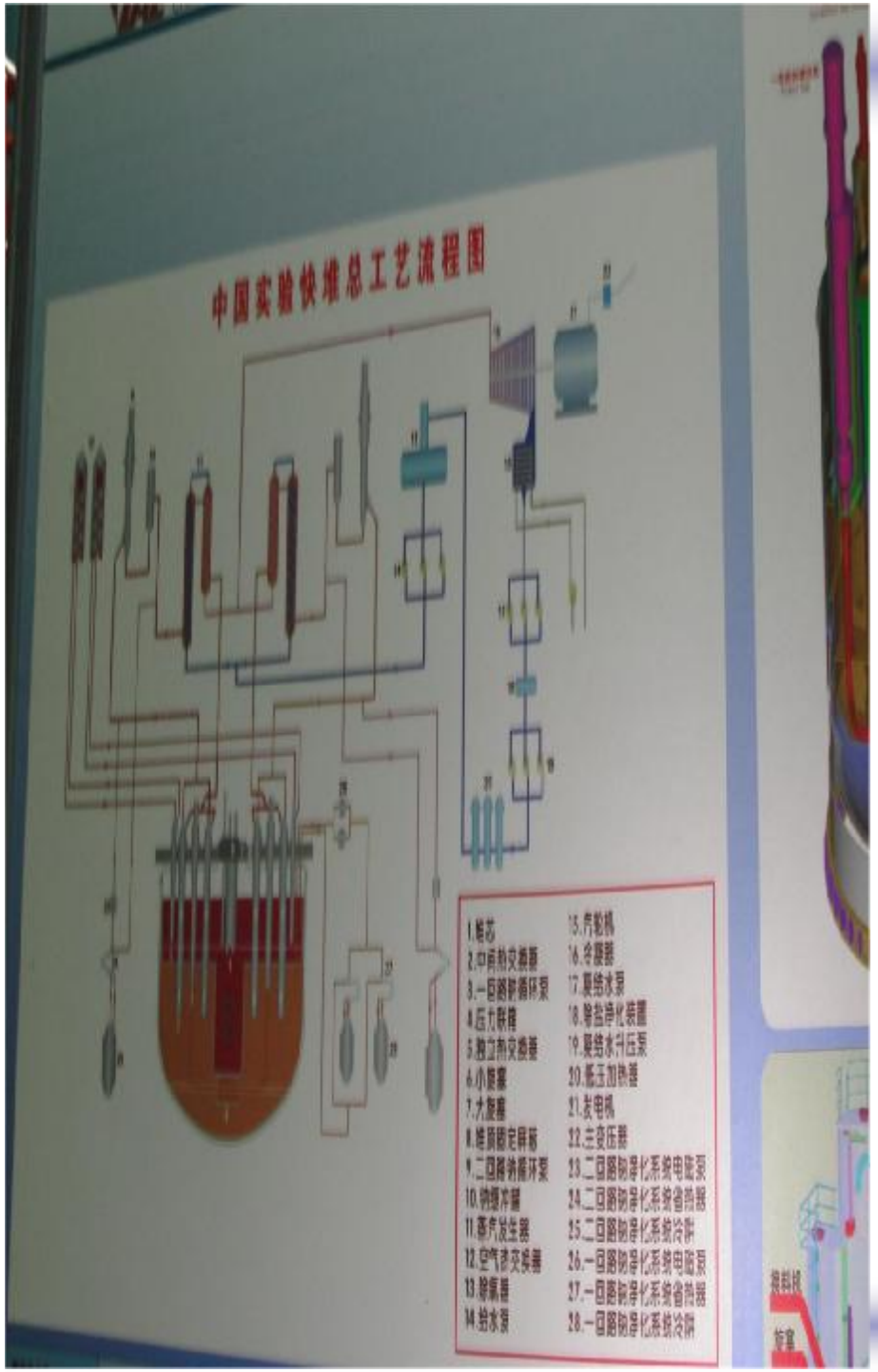
中国实验快堆已完成节点

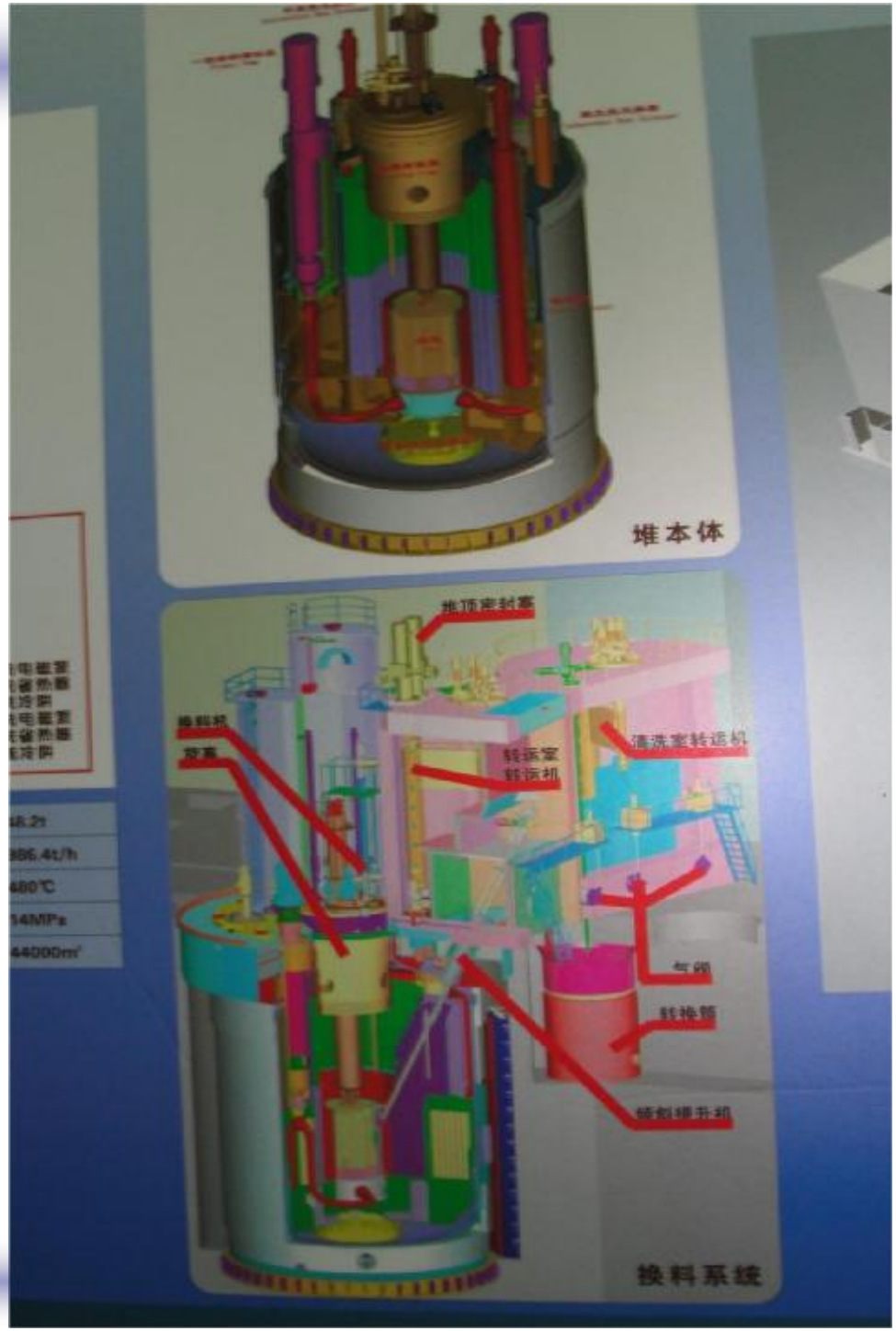
1.1995年12月29日，正式立项
2.2000年5月30日，第一罐混凝土浇注
3.2002年8月15日，核岛厂房封顶
4.2005年8月11日，堆本体安装开始
5.2006年6月29日，主容器安装完成
6.2007年6月28日，堆容器和堆内构件安装完成
7.2007年7月30日，主控室安装完成，交付调试
8.2008年12月21日，堆本体安装完成，综合冷调开始
9.2009年5月30日，堆本体充纳开始
10.2009年8月2日，具备装料条件

工程建设

中国核工业集团公司
中国核工业集团公司
产业布局图


堆本体
1 堆本体
2 新燃料装载机
3 新组件倾斜运输机
4 转换桶
5 乏燃料水池
6 乏燃料水池吊车
7 主控室
8 二回路钠净化系统
9 贮钠罐
10 电气控制间
11 仪表控制间
12 冷却塔
13 排风
14 堆大厅/吊车
15 空气热交换器
16 二回路钠净化系
17 蒸汽发生器
18 汽轮机组
19 发电机组
20 堆大厅防护顶
21 常规岛天车
22 电气控制间
23 基础


中国实验快堆总工艺流程图
1.堆芯
2.中间热交换器
3.一回路钠循环泵
4.后备停堆
5.蒸汽发生器
6.小膨胀
7.大膨胀
8.堆顶固定屏蔽
9.二回路钠循环泵
10.钠缓冲器
11.蒸汽发生器
12.空气冷却交换器
13.除氧器
14.给水泵
15.汽轮机
16.冷凝器
17.凝结水泵
18.除盐净化装置
19.凝结水升压泵
20.低压加热器
21.发电机
22.主变压器
23.二回路钠净化系统电磁泵
24.二回路钠净化系统省热器
25.二回路钠净化系统冷阱
26.一回路钠净化系统电磁泵
27.一回路钠净化系统省热器
28.一回路钠净化系统冷阱

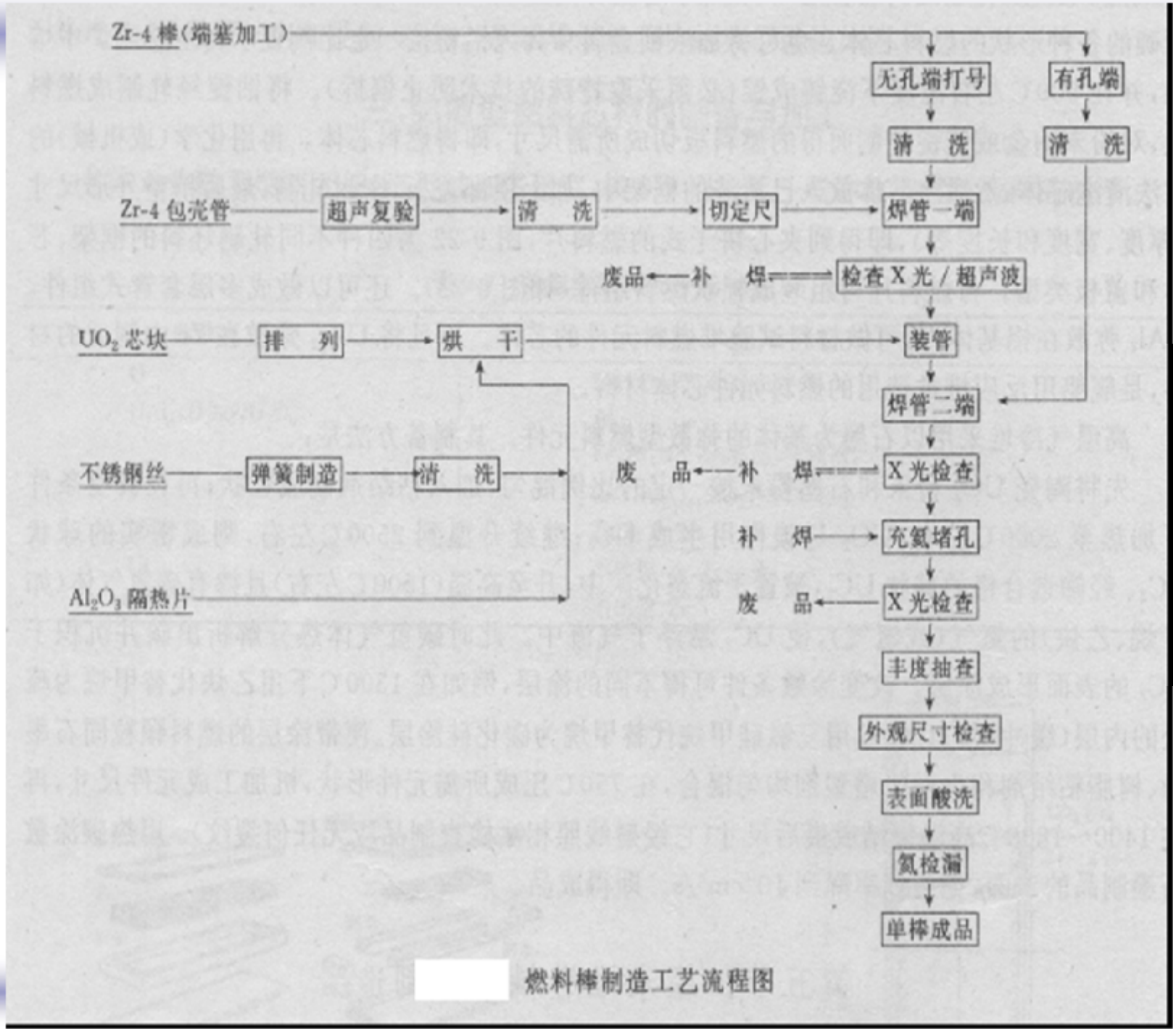

堆本体
换料系统

10.3 压水堆燃料元件制造

10.3.1 燃料棒制造工艺

核燃料循环

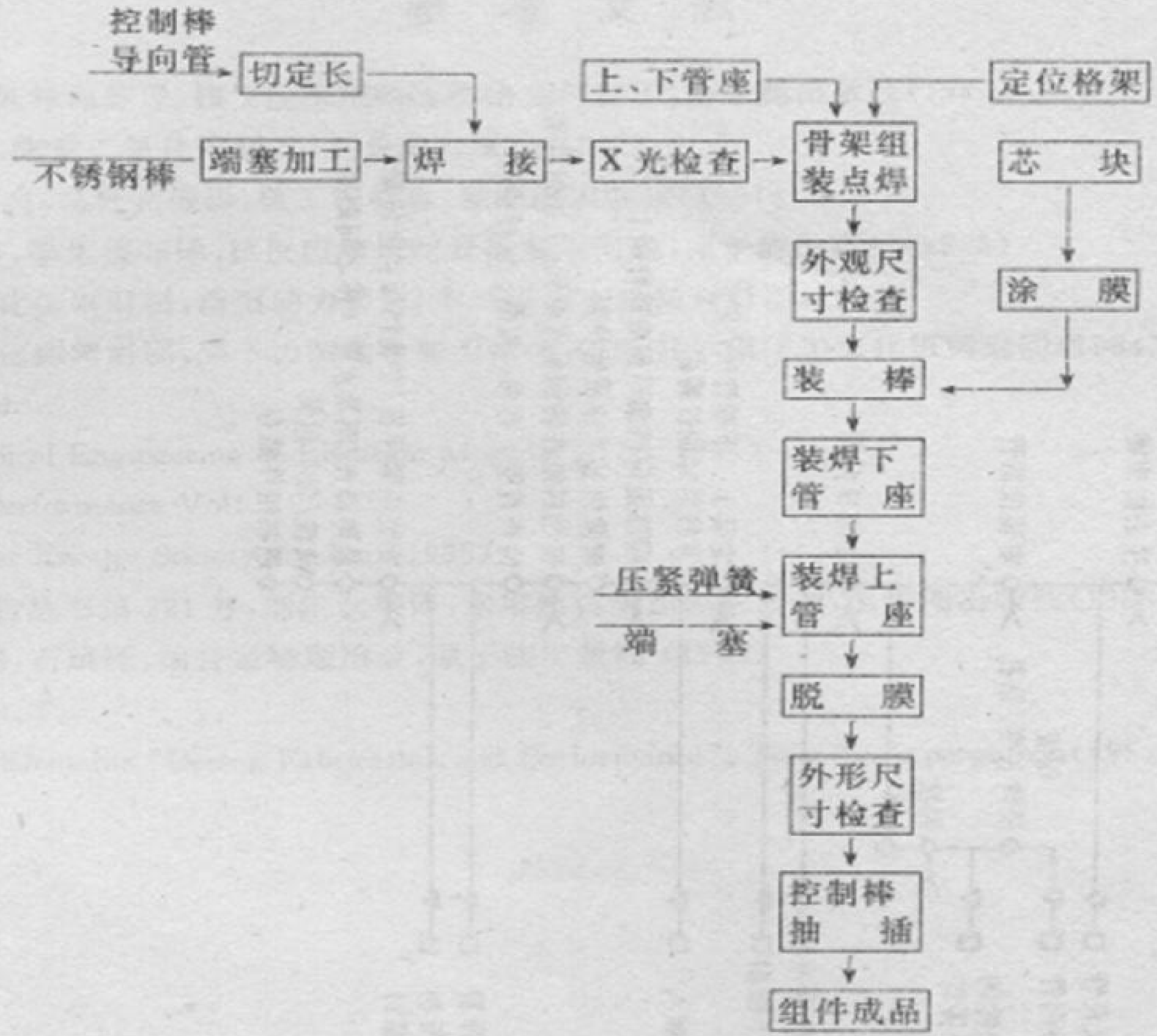
第十章　核燃料元件的制造



燃料棒制造工艺流程图

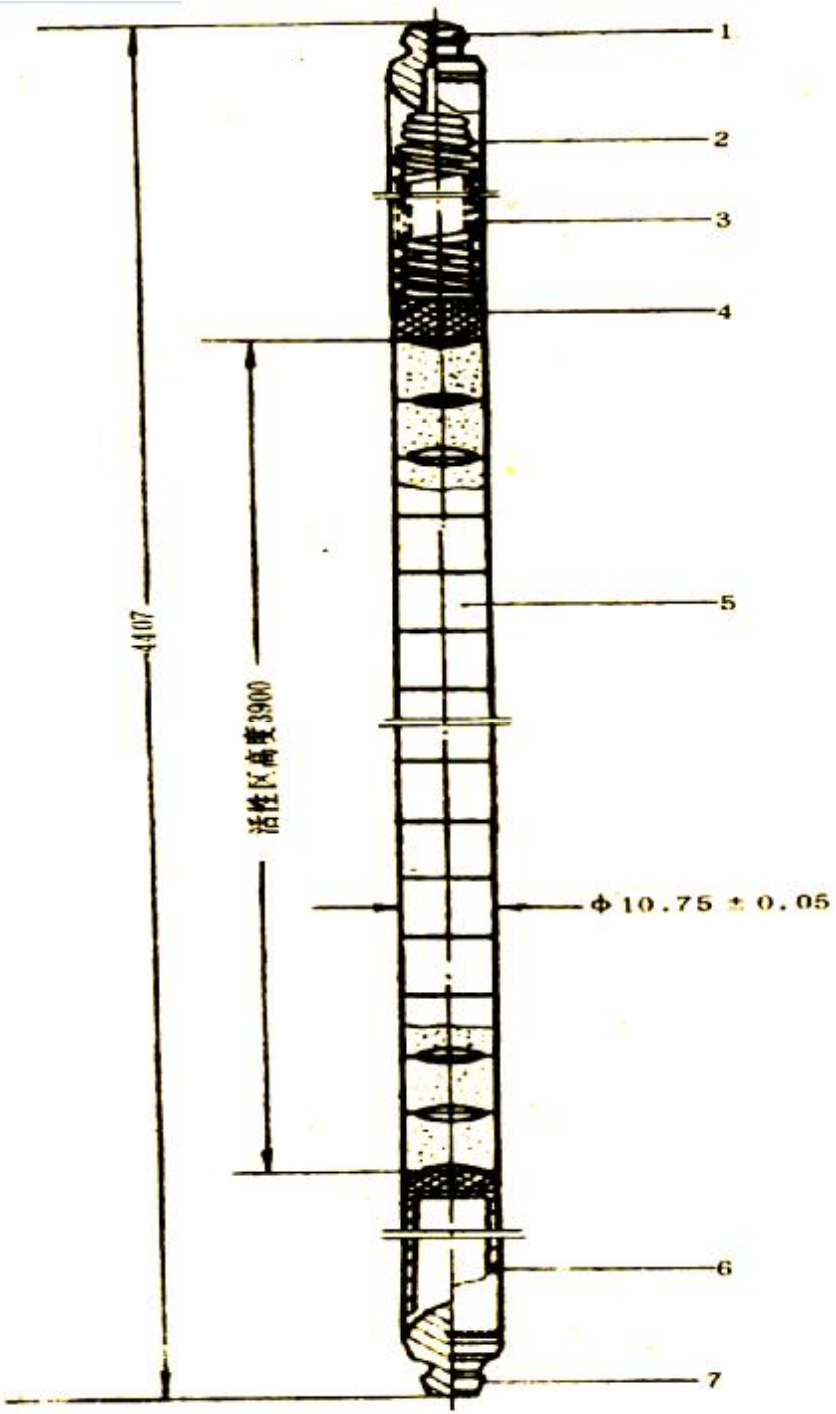
核燃料循环

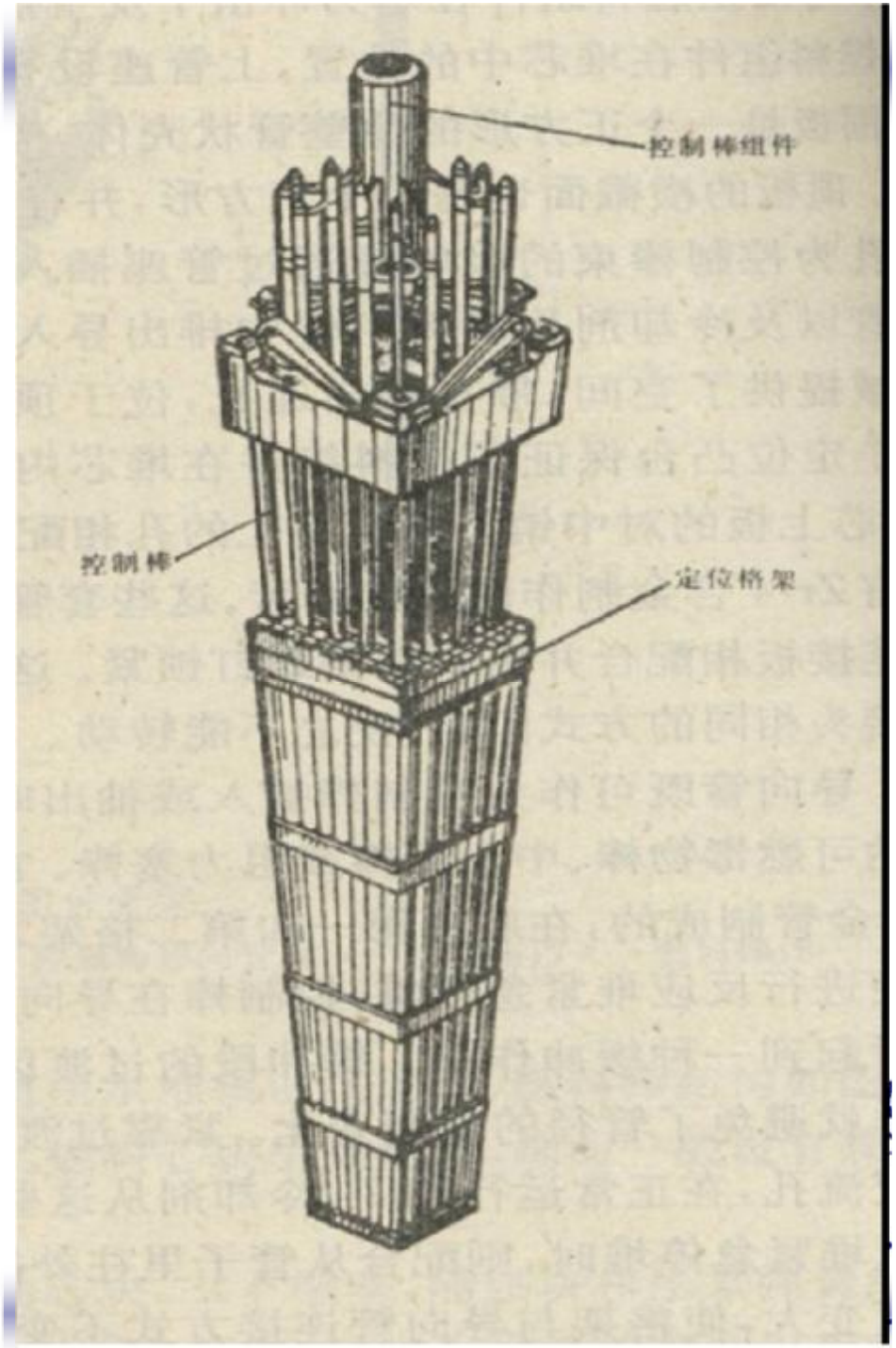
第十章　核燃料元件的制造

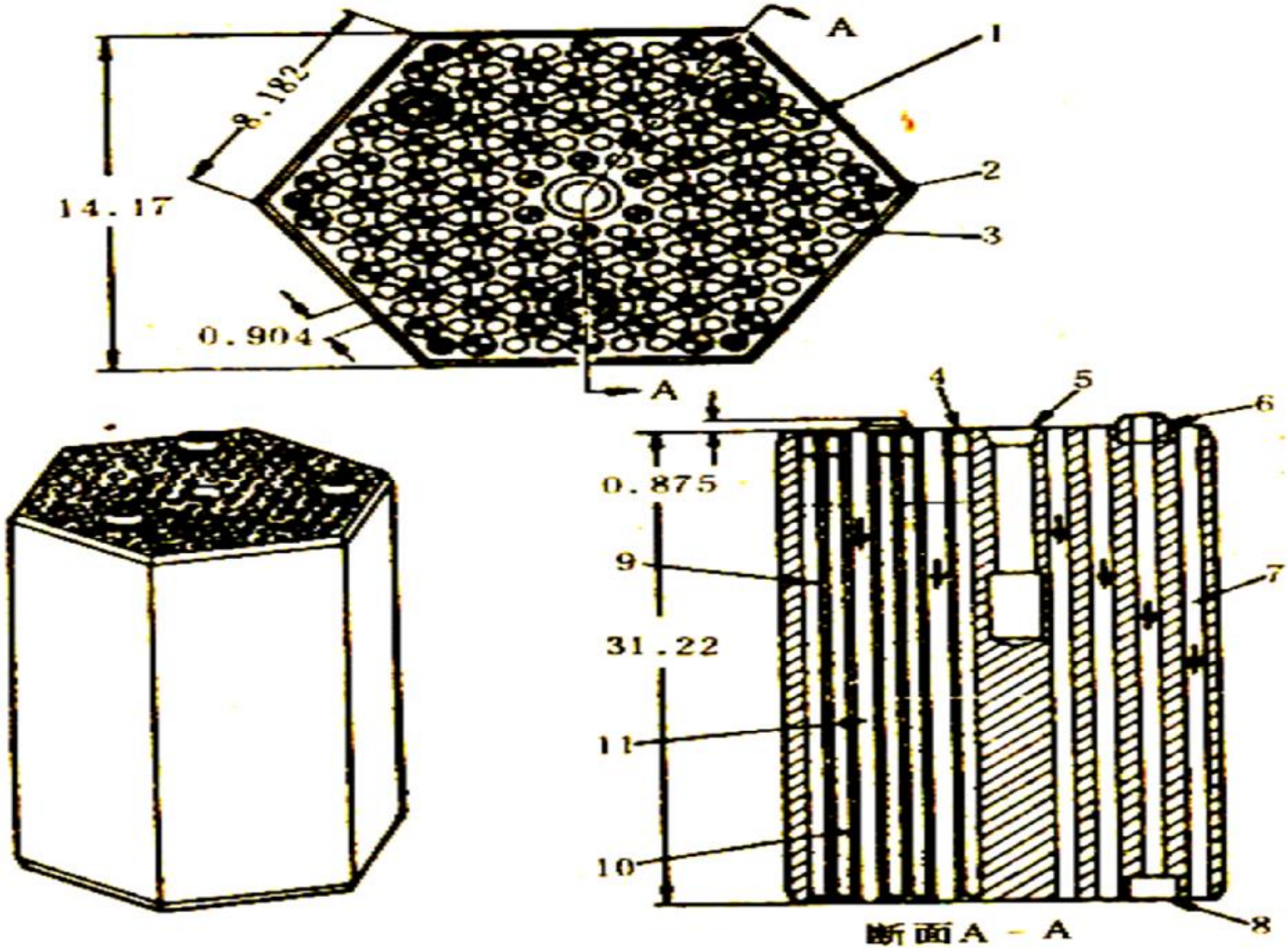


燃料组件组装工艺流程图

10.3.2 组件组装


1
2
3
4
5
6
7
4407
活性区高度3900
Φ10.75 ± 0.05


控制棒组件
控制棒
定位格架


A
1
2
3
8.182
14.17
0.904
A
4
5
6
0.875
9
7
31.22
11
10
8
断面A－A

第11章 核燃料元件入堆“燃烧”

11.1 核“燃烧”

——链式核反应（核裂变）

$$^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow {}^{140}_{54}\mathrm{Xe} + {}^{92}_{38}Sr + 2\,{}^{1}_{0}n + \mathrm{Q}$$

$$^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{97}_{39}Y + {}^{136}_{53}\mathrm{I} + 3\,{}^{1}_{0}n + \mathrm{Q}$$

(有40多种不同的裂变反应产生80多种裂变产物)

11.2 转换与增殖

11.2.1 可转换核素

$$^{238}_{92}\mathrm{U}+^{1}_{0}\mathrm{n}\rightarrow{}^{239}_{92}\mathrm{U}\xrightarrow{b^-}{}^{239}_{93}Np\xrightarrow{b^-}{}^{239}_{94}Pu$$

$$^{232}_{90}Th+^{1}_{0}n\rightarrow{}^{233}_{90}Th\xrightarrow{b^-}{}^{233}_{91}\mathrm{Pa}\xrightarrow{b^-}{}^{233}_{92}U$$

10.2.2 核燃料增殖

燃料“燃烧”后新生的燃料核素比燃烧消耗的燃料核素多，即得到了比烧掉的燃料更多的新生燃料。这样对于充分利用核燃料资源，发展核能有着十分重要意义。

11.3 反应堆分类

按使用目的分

- 生产堆
- 动力堆
- 研究堆
- 发电增殖两用堆

按引起核裂变的中子能量分类

- 快中子堆
- 中子能量分类
- 中能中子堆
- 热中子反应

按冷却剂慢化剂的不同分类

- 轻水堆
- 重水堆
- 石墨气冷堆
- 石墨水冷堆

按核燃料在堆内分布形式分类

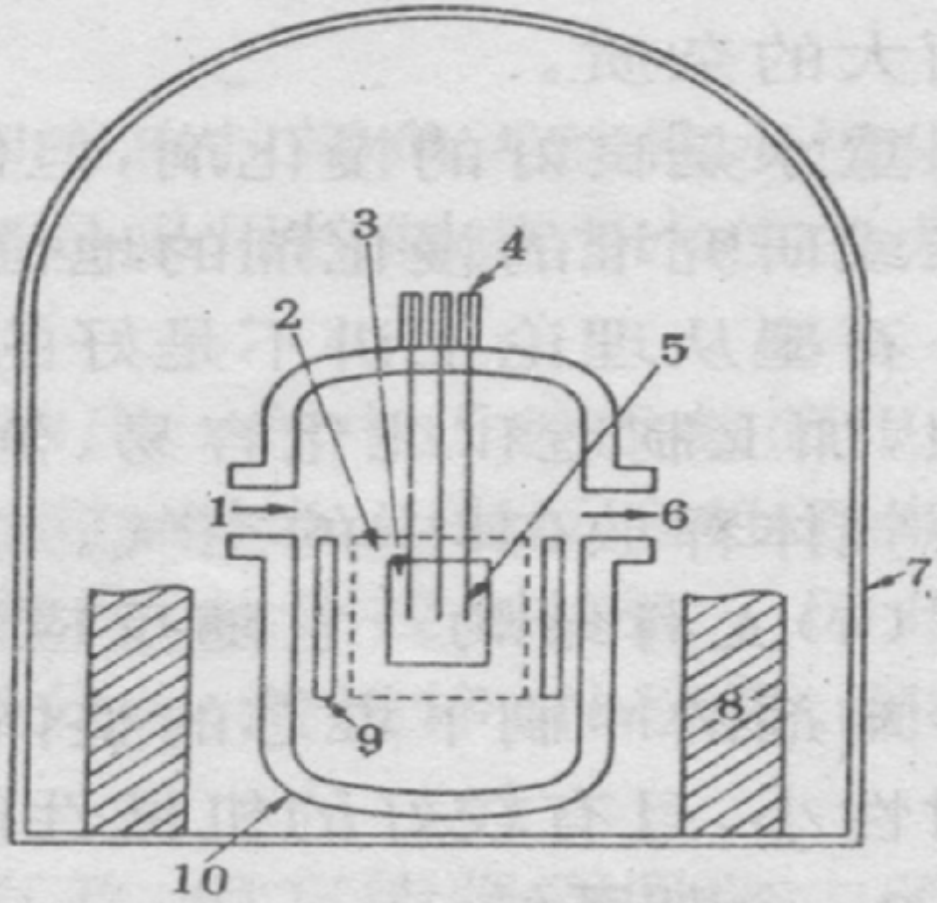
- 均匀堆
- 非均匀堆

11.4 反应堆组成

- 堆芯
- 冷却系统
- 慢化剂
- 控制系统
- 反射层
- 屏蔽系统
- 反应堆容器
- 辐射监测系统
- 其它的辅助系统

核燃料循环

第十一章　核燃料元件入堆“燃烧”



压水堆主要组成

1-冷却剂入口；2-反射层；3-堆芯；4-控制棒驱动机构；5-控制棒组件；6-冷却剂出口；7-安全壳；8-生物屏蔽体；9-热屏蔽体；10-压力容器。

第12章　乏燃料后处理

乏元件从堆内卸出后，从“燃烧过”的乏燃料和辐照过的转换材料中，提取未耗尽的和新生的易裂变核素，并从裂变产物中提取有用的同位素。

12.1 目 的

提取和纯化新生成的易裂变核素（$^{239}P/^{233}U$），回收和纯化没有用完的易裂变核素（$^{235}U/^{239}Pu$）和尚未转换的可转换的材料^{238}U。提取有用的裂变产物（$^{90}Sr,^{137}Cr$等）和超铀元素（^{237}Np，^{241}Am）处理放射性废物，使其适合于长期安全储存。

12.2 工艺特点

远距离操作、控制和检查

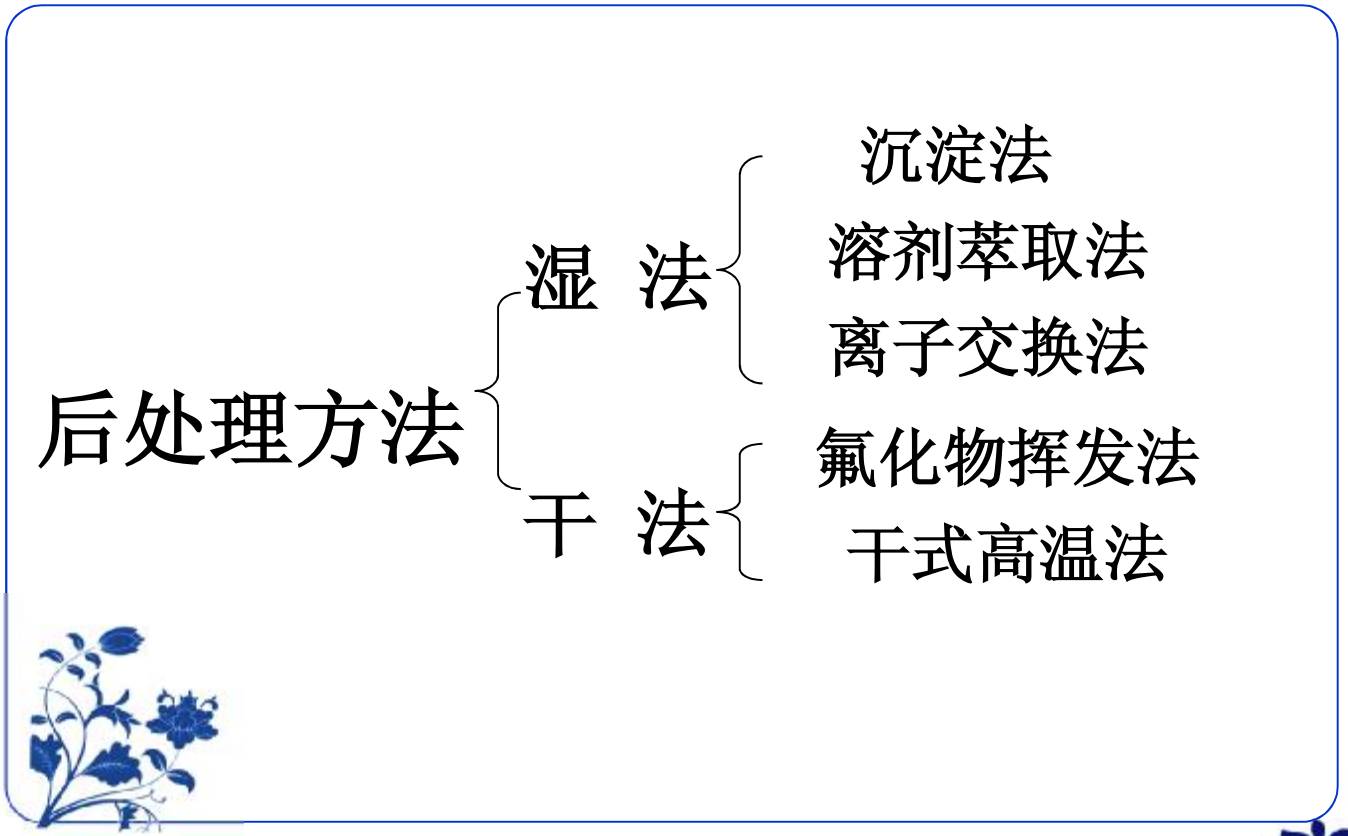
屏蔽、耐辐照

防止临界事故的发生

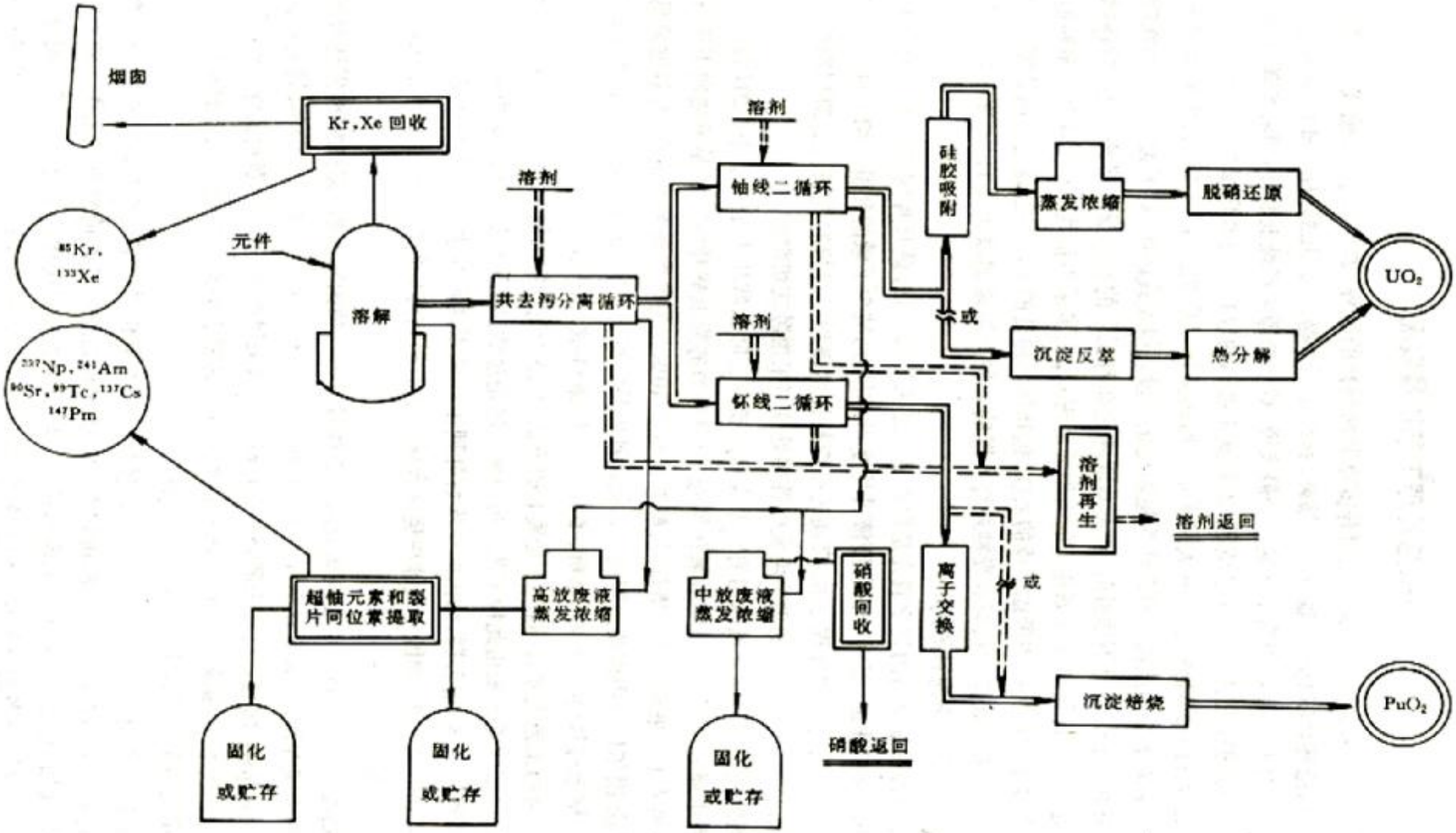
安全防护系统

设备安全可靠，密封性能良好

12.3 方 法



12.4 Purex流程简介



中核四0四有限公司、南华大学产学研基地合作建设协议签字暨兼职教授聘任仪式
南华新闻网
http://61.187.179.68

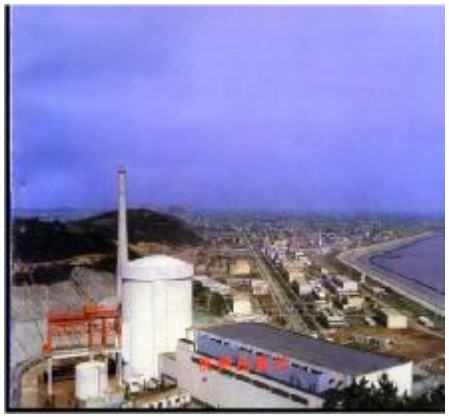
八二一厂与南华大学交流座谈会
夏宝生
黄明

HL-2A
S
SSD
SD

第13章　乏燃料废物最终处理

将提取了易裂变核素和有用同位素以后的强放射性，腐蚀性废物进行处理和最终处置。

高放废物地质处置

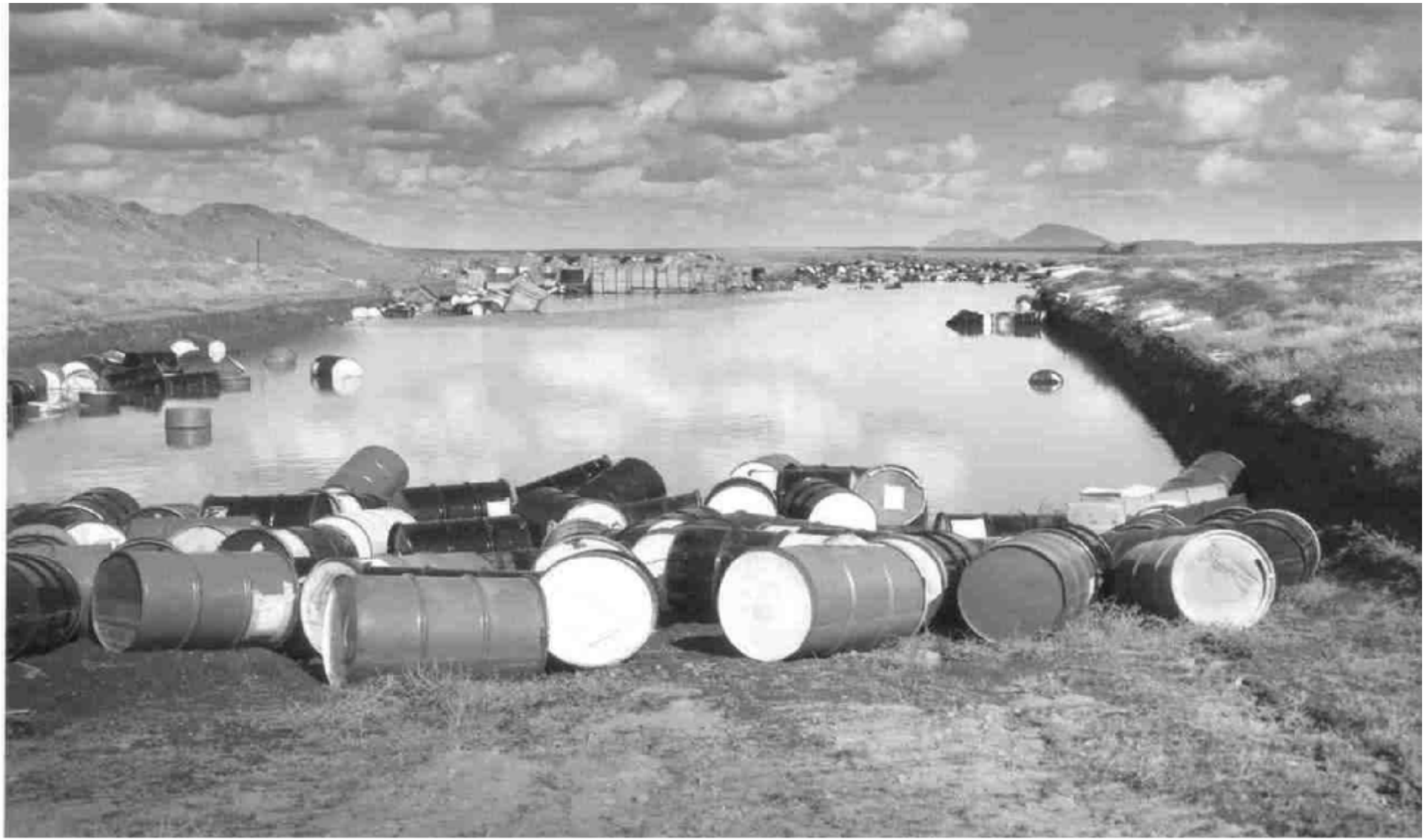


放射性废物！

早期的低中水平放射性废物浅埋

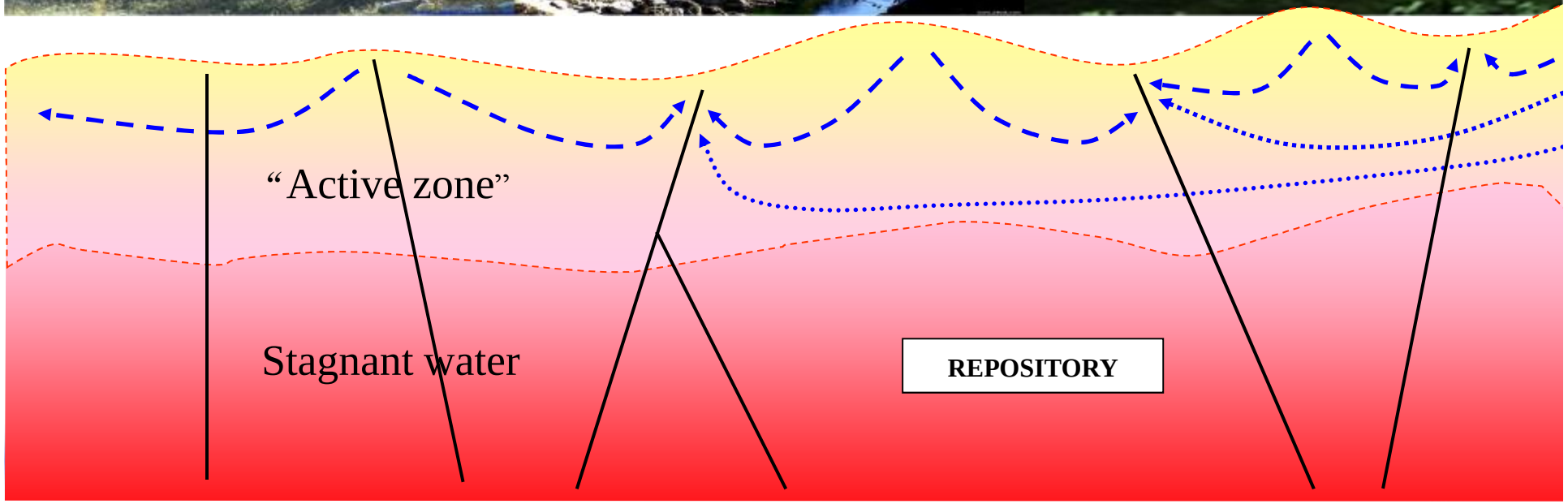
Lenhard et al., Vadose Zone J. 2004, 3, 1-5.

Pit 9 Flood in 1969

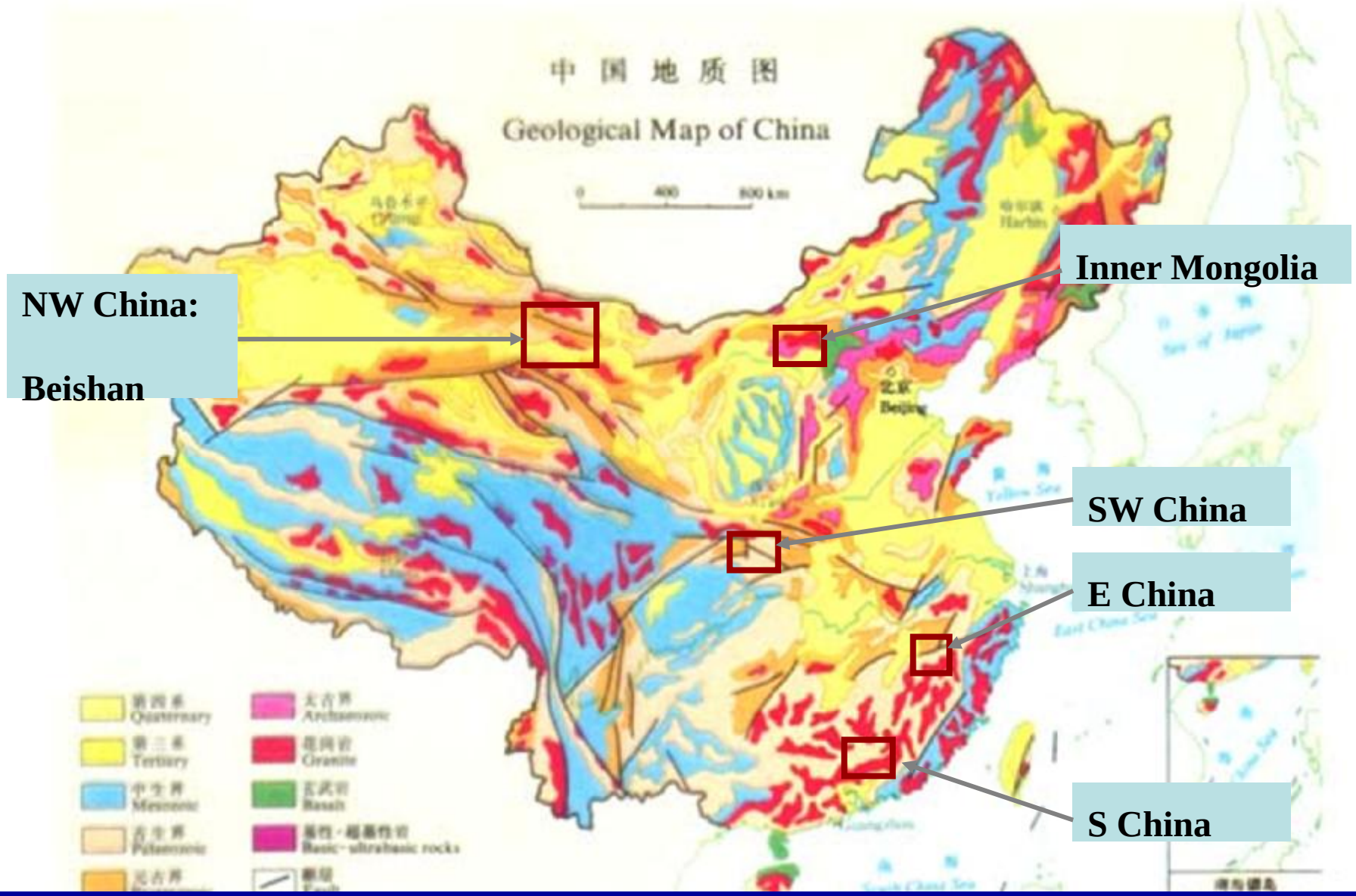


核素在地质体中行为研究

放射性核素在环境中的行为

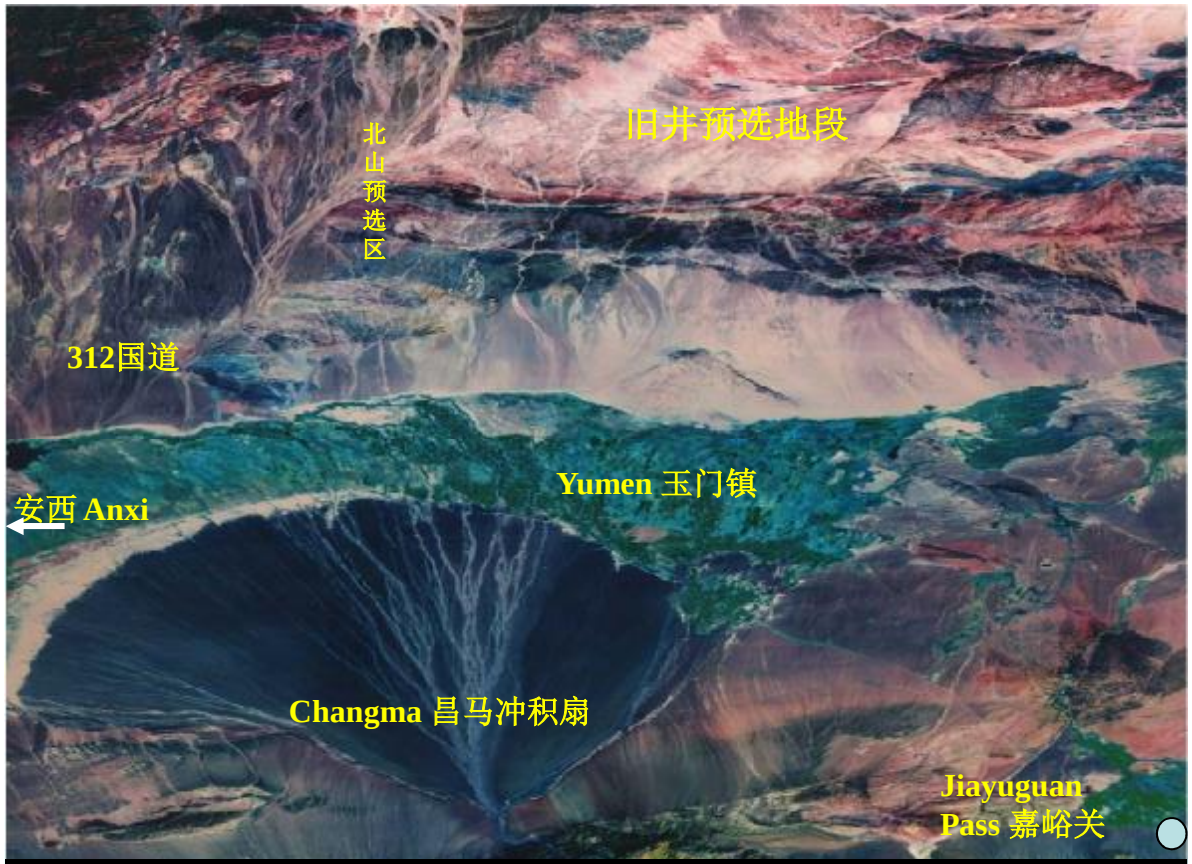


我国高放废物地质处置的选址情况



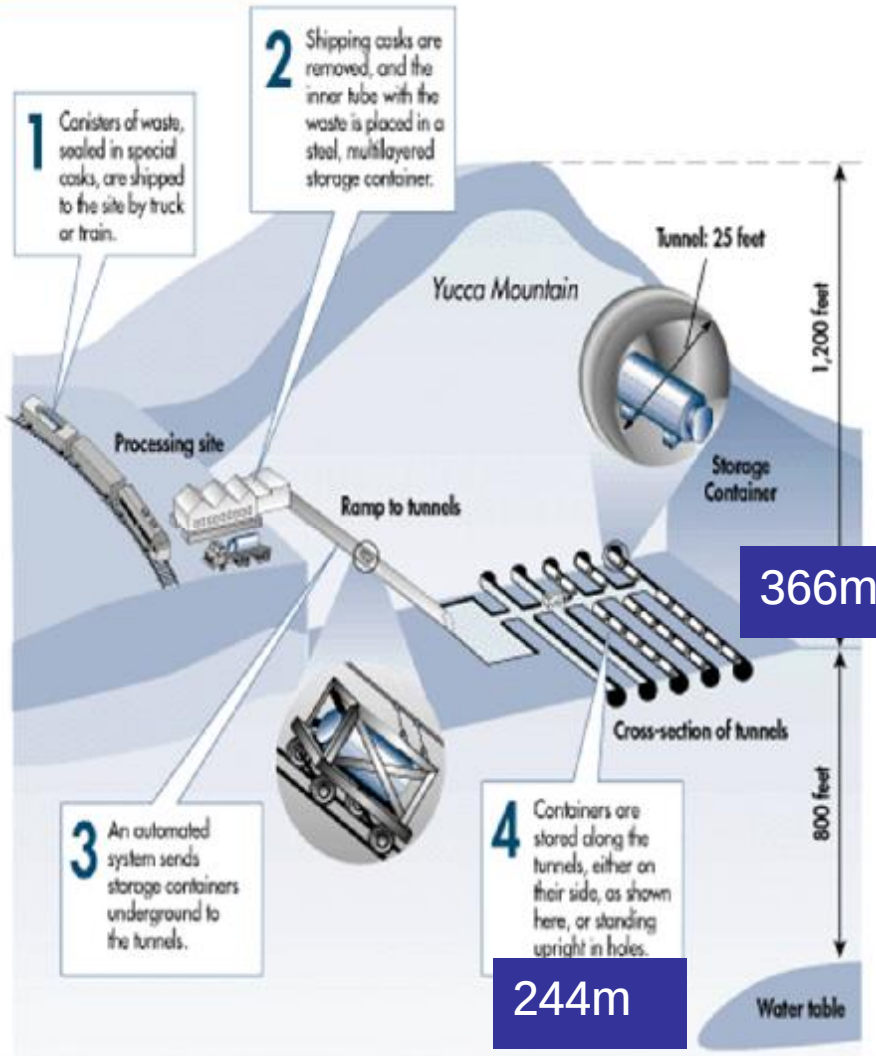
Pre-selected regions for China's HLW repository

我国高放废物处置库重要研究区



甘肃北山地理位置及卫星影象图

美国Yucca Mountain 废物处置库概况



Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.

Yucca Mountain, Nye County, NV
About 100 miles northwest of
Las Vegas

Yucca Mountain 废物处置库概况

- **Yucca Mountain repository**
- **Legislated capacity: 70,000 t (waste quantity by 2010)**
- **>90% is spent fuel from commercial power plants**
- **Compliance period: 10,000 years**

我国核电乏燃料产生情况

- **By 2010　　1,000 MTU**
- **By 2015　　2,000 MTU**
- **After 2020　　1,000 MTU/year**
- **2050年：　　45000 t in total**
- **2060年：　　60000 t in total**
- Based on the installed nuclear power capacity in China will be
- **20 GW in 2010**
- **40 GW in 2020**

我国高放废物地质处置

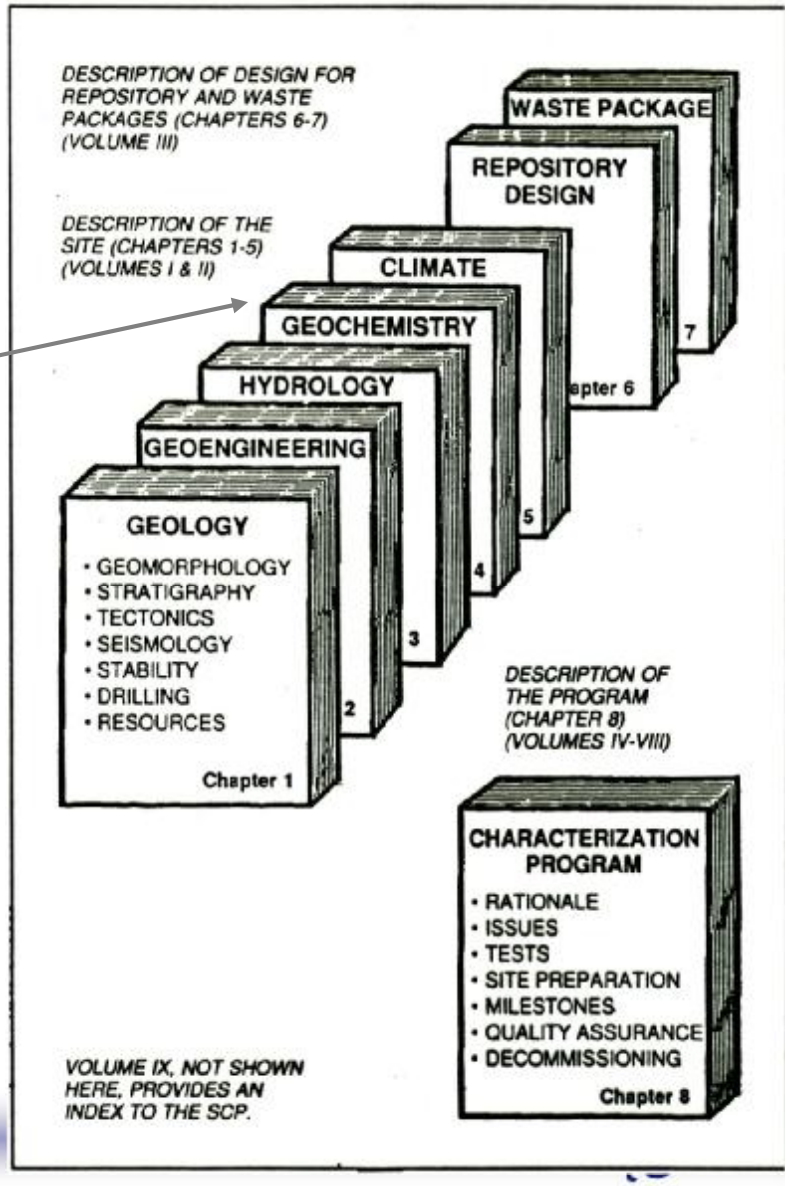
- 2007-2020，实验室研究阶段
- 2020-2040，地下实验室阶段
- 2040-2060，处置库建造

废物处置安全评价

核燃料循环

第十三章　乏燃料废物最终处理

- 需要回答的主要问题：
  - 地质构造稳定性；
  - 工程地质可行性；
  - 水力学条件适应性；
  - 地球化学特征及影响；
  - 气候条件的影响；
  - 处置库设计及废物包装



谢谢！