

核能的可持续发展和快堆

徐铎

中国原子能科学研究院

2007年09月25日

内 容

- 1 序言
- 2 什么是核能
- 3 我国需要可持续发展的大规模核能
- 4 开发快中子增殖堆，有效利用铀资源
- 5 如何发展快中子增殖堆
- 6 结语

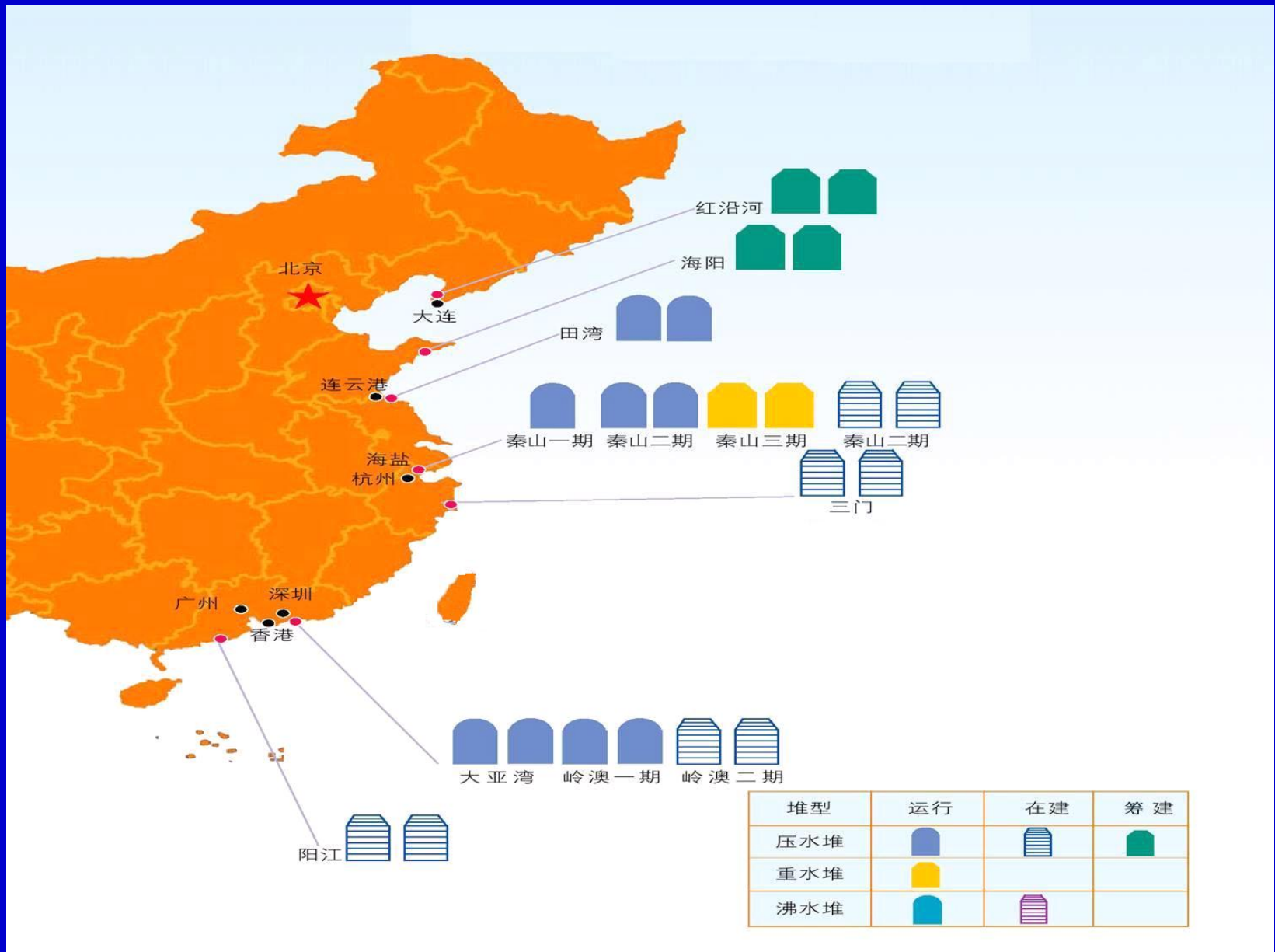
1 序言

我国国民经济发展有较快的速度，相应的一次能源消耗也有较快的增长速度。

我国国民经济总产值和一次能源生产

年	2001	2002	2003	2004	2005	2006
总产值 (Billion RMD)	10,986	12,033	13,582	15,988	18,232	20,940
年增率 (%)	8	9.1	10.0	10.1	9.9	10.7
一次能源 (Billion 吨标煤)	1.43	1.52	1.75	2.03	2.23	2.46
年增率 (%)		6.3	15.0	16.0	10.0	12.0

- 2006年人均一次能源消耗~1.9吨标煤，略低于世界平均水平2.1吨标煤。
- 我国一次能源消耗还会不断增长。
- 核能是我国多元化能源结构中的一员。



我国大陆核电厂分布图

摘自潘自强院士2007武汉核学会年会报告

秦山一期核电厂300MW



1991年12月15日并网发电

大亚湾核电厂2×900MW



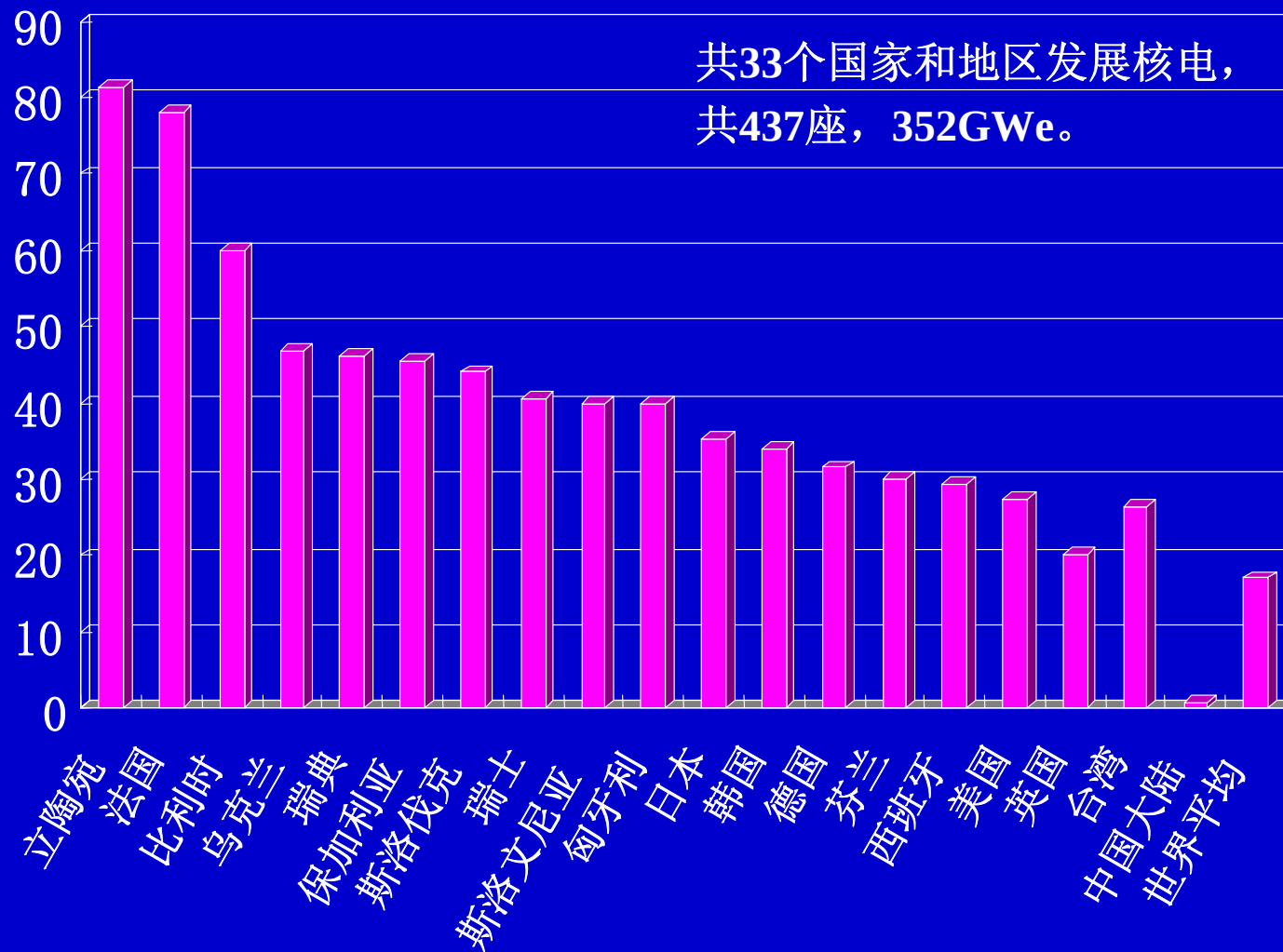
1994年2月1日和5月6日
两个机组分别投入商业运行

中国大陆核电厂

核电厂	容量/类型	并网	负荷因子 (%)						
			2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Qinshan I	300MW/PWR	1991.12.15	77.2	94.1	66.9	88.6	99.8	86.72	91.44
Daya Bay -1	900MW/PWR	1993.08.31	85.2	84.9	89.6	89.6	87.2	99.79	80.31
-2	900MW/PWR	1994.02.07	84.9	89.1	81.6	84.5	73.6	79.44	99.68
Qinshan II -1	600MW/PWR	2002.02.01			74.9	81.0	82.2	92.76	55.20
-2	600MW/PWR	2004.03.11						85.19	90.30
Lingao -1	984MW/PWR	2002.04.05			92.0	76.8	87.76	82.69	89.16
-2	984MW/PWR	2002.12.15				85.0	79.9	90.57	91.89
Qinshan III -1	700MW/PHWR	2002.11.10				90.2	77.3	84.05	98.20
-2	700MW/PHWR	2003.06.12				90.4	94.0	81.05	88.70
Tianwan -1	1000MW/PWR	2006.06.12							
-2	1000MW/PWR	2007.05.14							

目前我国核电约占全国电力生产的2%，而当前世界核电占**16%**

各国核电与总发电量的比例



令人满意的运行记录，鼓励国人相信核能是安全、可靠、经济性可接受和能大规模应用的能源。

2006年2月9日发布的国家中长期科技发展规划纲要（2006～2020）中指出：

（1）.....大力发展能源技术，形成核电系统技术自主开发能力,.....;

（2）.....先进核能系统（GIV），核燃料循环和聚变能技术越来越受到关注,.....。

政府决策近期核电目标:

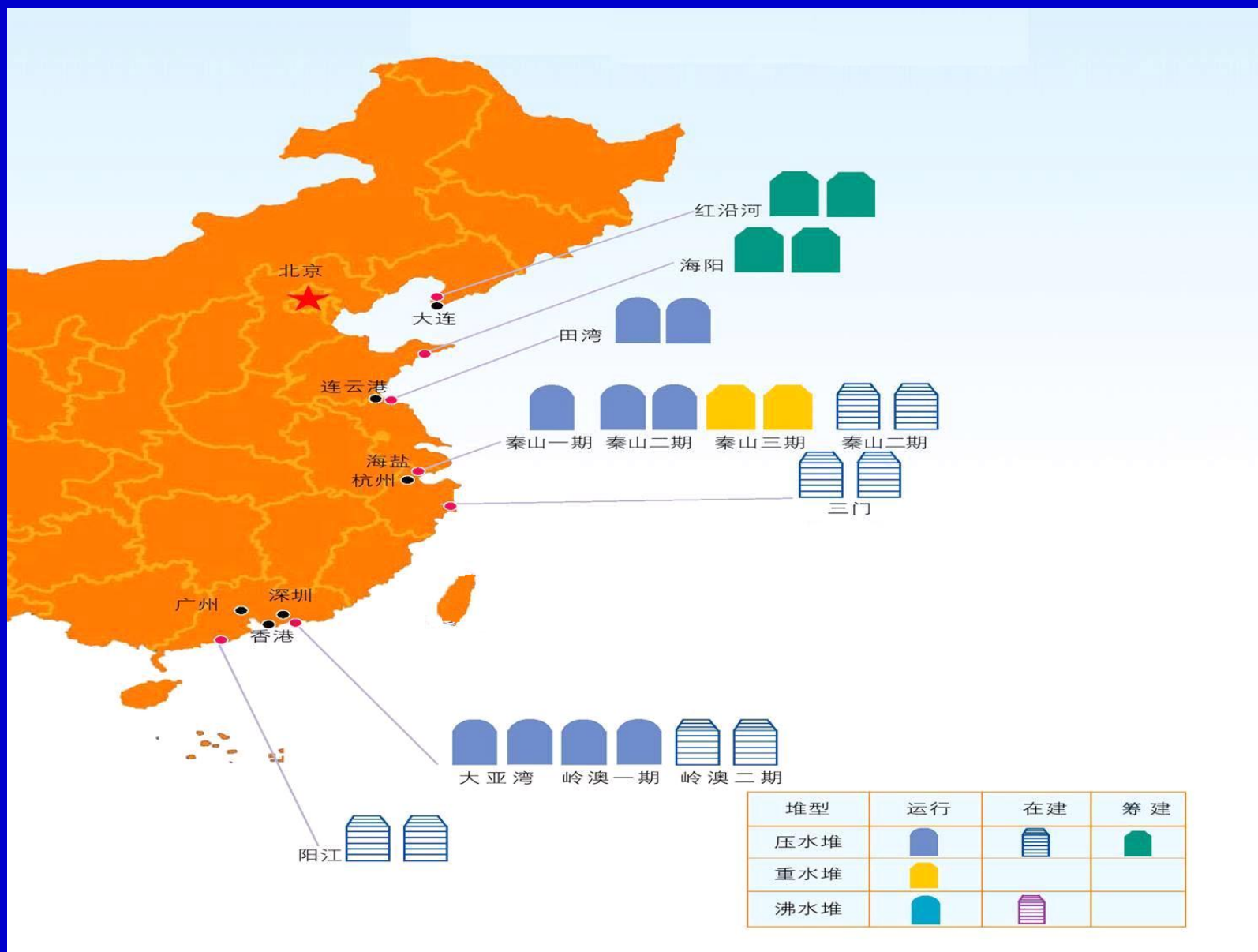
2020年运行40GWe, 在建18GWe。

目前:

- **$2 \times 1000\text{MWe}$ PWRs, $2 \times 650\text{MWe}$ PWRs和 $4 \times 1000\text{MWe}$**

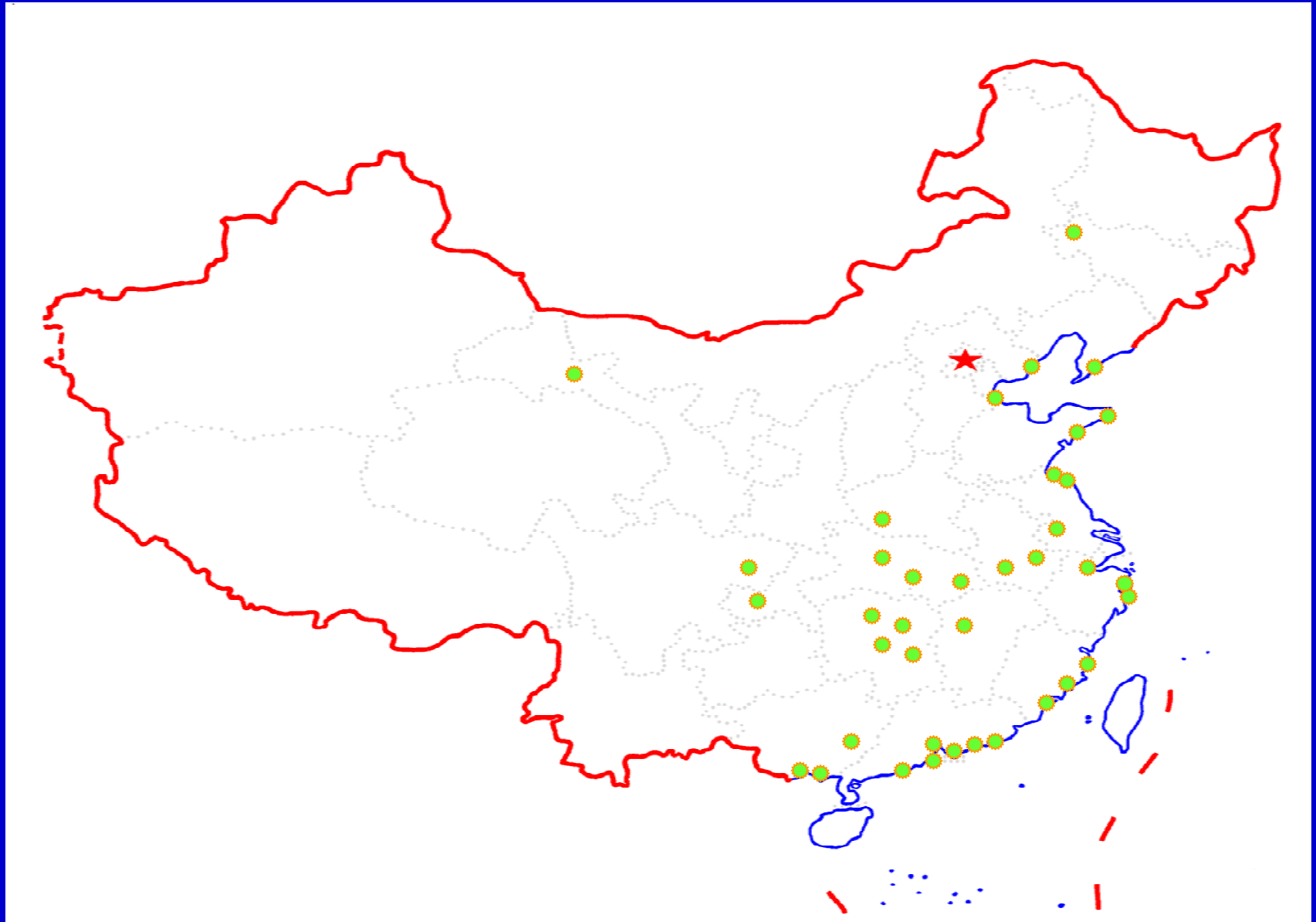
PWRs已开始建造;

- **5座核电站共10 PWRs已获政府批准;**
- **为34 PWRs的厂址已作了准备。**



我国大陆核电厂分布图

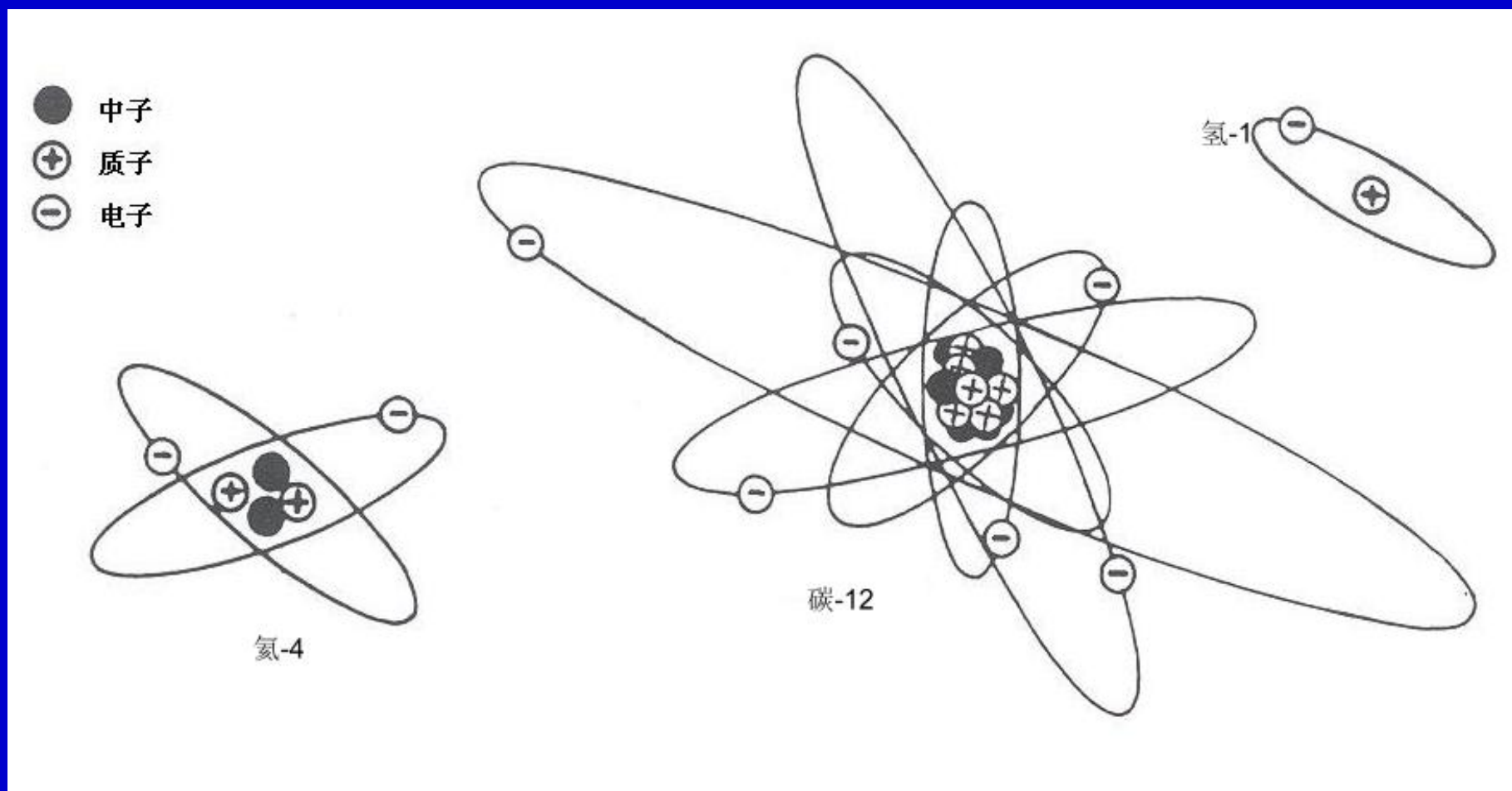
摘自潘自强院士2007武汉核学会年会报告



核设施未来分布预测图

摘自潘自强院士2007武汉核学会年会报告

2 什么是核能



原子、原子核及核结构

1a																				7a				0													
1 H 1.0080										2a										1 H 1.0080				2 He 4.003													
3 Li 6.940										4 Be 9.013																											
																				3a				4a		5a		6a									
11 Na 22.991										12 Mg 24.32										5 B 10.82				6 C 12.011		7 N 14.008		8 O 16.0000		9 F 19.00		10 Ne 20.183					
13 Al 26.98										14 Si 28.09										15 P 30.975		16 S 32.066		17 Cl 35.457		18 Ar 39.944											
19 K 39.100										20 Ca 40.08										21 Sc 44.96				22 Ti 47.90		23 V 50.95		24 Cr 52.01		25 Mn 54.94		26 Fe 55.85		27 Co 58.94			
37 Rb 85.48										38 Sr 87.63										39 Y 88.92				40 Zr 91.22		41 Nb 92.91		42 Mo 95.95		43 Tc 101.1		44 Ru 102.91		45 Rh 102.91			
55 Cs 132.91										56 Ba 137.36										57-71 see La Series				72 Hf 178.50		73 Ta 180.95		74 W 183.86		75 Re 186.22		76 Os 190.2		77 Ir 192.2			
87 Fr 226.05										88 Ra 226.05										89-102 see Ac Series																	

元素、同位素和周期表

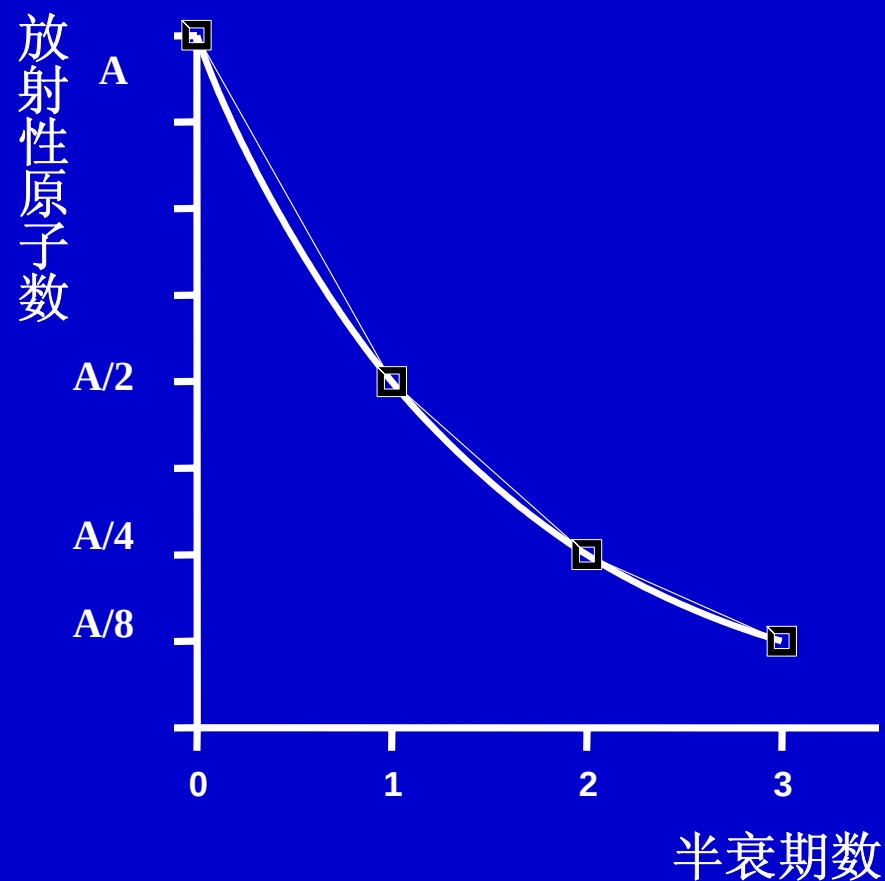
同位素的例子

氢	又名	质子数	中子数	天然丰度
${}^1_1\text{H}$		1	0	>99.8%
${}^2_1\text{H}$	${}^2_1\text{D}$ (氘)	1	1	0.015%
${}^3_1\text{H}$	${}^3_1\text{T}$ (氚)	1	2	~0%

铀	质子数	中子数	天然丰度
${}^{232}_{92}\text{U}$	92	140	
${}^{233}_{92}\text{U}$	92	141	
${}^{234}_{92}\text{U}$	92	142	0.006%
${}^{235}_{92}\text{U}$	92	143	0.712%
${}^{236}_{92}\text{U}$	92	144	
${}^{237}_{92}\text{U}$	92	145	
${}^{238}_{92}\text{U}$	92	146	99.282%

放射性

- 对任何元素，中子数在一定范围内原子核是稳定的。如 ${}^2_1\text{H}$ 、 ${}^{12}_6\text{C}$ 、 ${}^{23}_{11}\text{Na}$ ；
- 中子数如太多或太少，则原子核便不稳定，要用辐射的形式放出能量称为放射性，这个同位素又称放射性同位素。如 ${}^3_1\text{H}$ 、 ${}^{14}_6\text{C}$ 、 ${}^{24}_{11}\text{Na}$ 、 ${}^{22}_{11}\text{Na}$ 等；



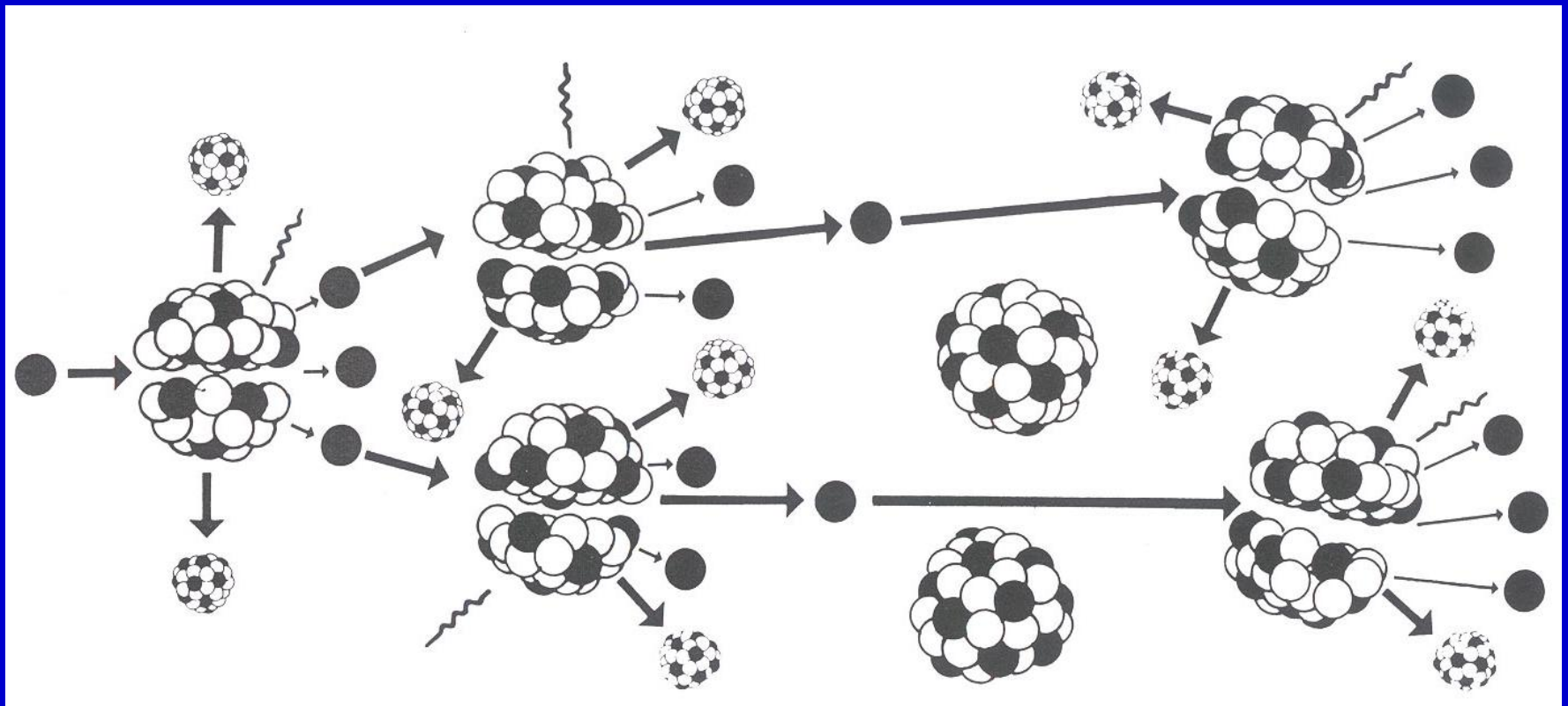
放射性衰变曲线

辐射的类别

- α 辐射 ${}_{92}^{232}\text{U} \xrightarrow{\alpha} {}_{90}^{228}\text{Th}$
- β 辐射 ${}_{92}^{239}\text{U} \xrightarrow[\text{T}_{1/2}=23.5\text{min}]{\beta^-} {}_{91}^{239}\text{Np} \xrightarrow[\text{T}_{1/2}=2.35\text{day}]{} {}_{94}^{239}\text{Pu}$
- γ 辐射 ${}_{27}^{59}\text{Co} + \text{n} \longrightarrow {}_{27}^{60}\text{Co} \xrightarrow{\gamma}$
- 中子辐射 ${}_4^9\text{Be} + {}_2^4\text{He} \longrightarrow {}_6^{12}\text{C} + \text{n}$

核裂变和裂变能，裂变的链式反应

- 1934年Fermi, 1938、1939Hahn和Strassman用中子轰击铀的实验发现了裂变现象。1939年Meitner、Frisch、Bohr和Wheeler理论上解释了这一现象，重定名为原子核的裂变。



裂变链式反应

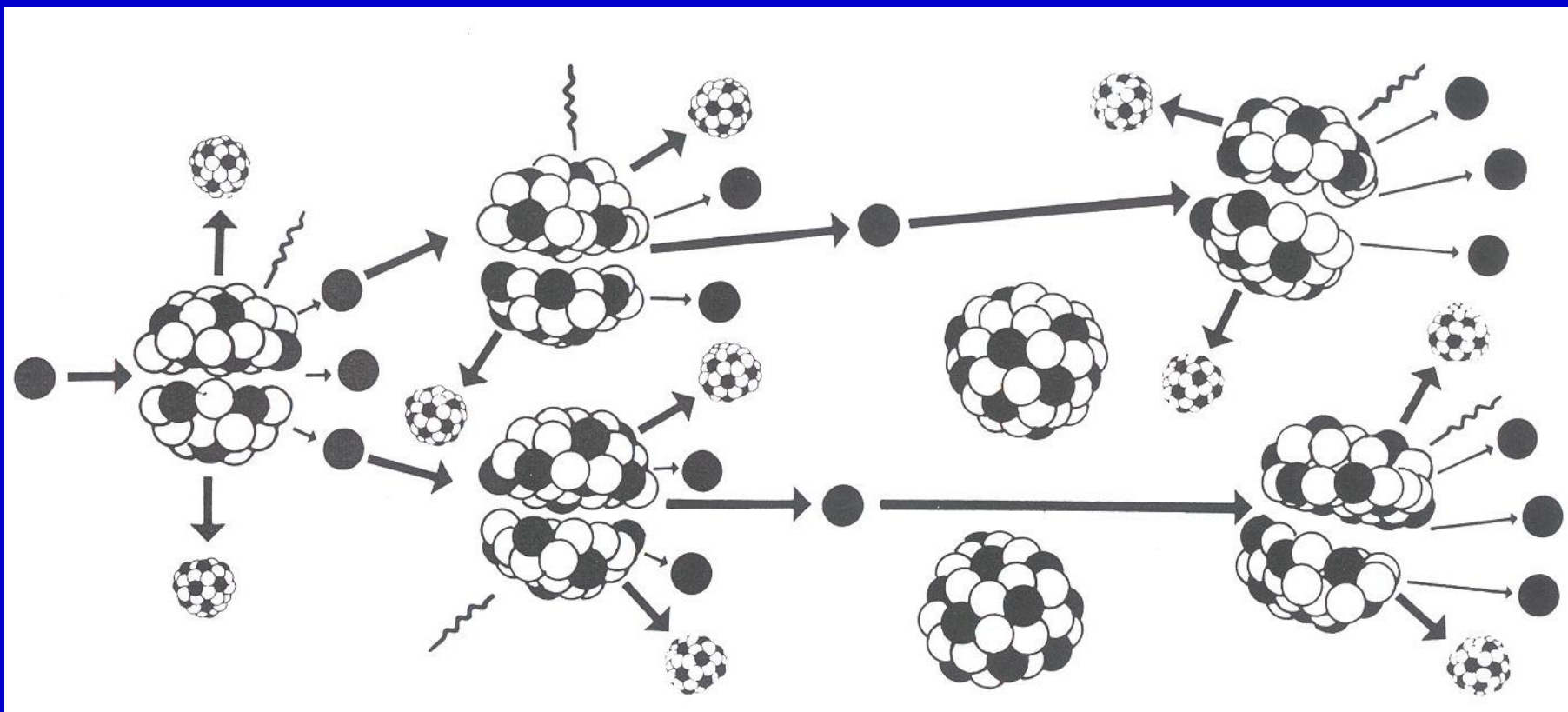
裂变反应有很多可能的结果，作为一例：



1kg铀235裂变所释放的能量相当2700t无烟煤燃烧放出的能量。

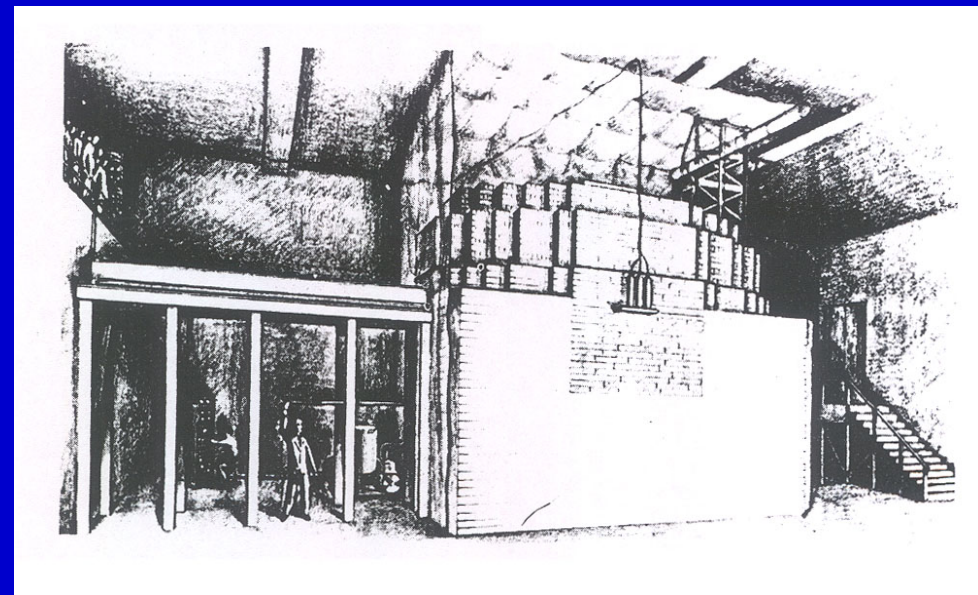
裂变核能释放的两种可能性

- 不可控的裂变链式反应；
- 可控的裂变链式反应。



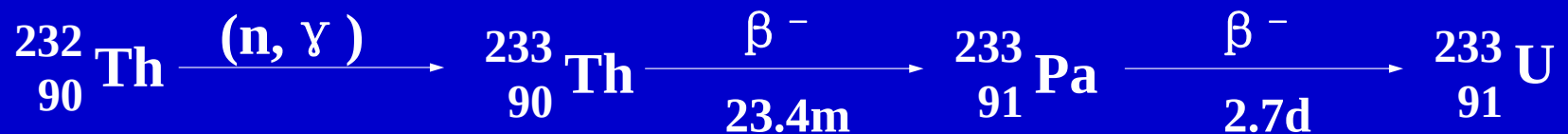
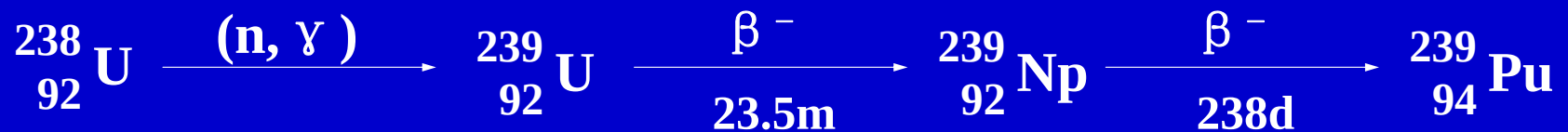
裂变链式反应

- 可控的裂变链式反应首次于1942年在芝加哥大学实现。装置名为CP-1;
- 物理学家Enrico Fermi和他的同事们于1942年12月2日在运动场正面看台下面临时实验室里实现了第一次自持可控反应。这个实验的成功把我们引进到对于现代科学展现巨大潜力的原子时代。



实现可控裂变链式反应的基本要素

1) 可裂变材料;



2) 吸收中子能力强的材料, 镉Cd, 硼B等;

3) 对利用慢中子实现可控裂变链式反应需用慢化剂, H_2O , D_2O , C等;

4) 可把裂变能载带出来的冷却剂, H_2O , D_2O , 氦He, CO_2 , 钠Na等。

这种装置便定名为**反应堆** (Reactor)

核聚变的聚变能



- 条件：温度5000万度；
离子密度100万亿个/cm³；
维持时间0.1~1秒。
- ${}^2_1\text{D}$ 用重水（D₂O）电解；
- ${}^3_1\text{T}$ 用锂（Li）生产。天然锂含 ${}^6_3\text{Li}$ 7.5%和 ${}^7_3\text{Li}$ 92.5%。



- 1kg D-T聚变时放出的能量相当于1万吨无烟煤燃烧的能量。

核能的利用

- 同位素放射性衰变时要放出能量，利用这种能量可以做成电池用于宇宙飞船、人造卫星、无人管理的灯塔等；
功率：毫瓦至百瓦。
- 聚变核能目前尚在技术发展阶段，距实际应用为时尚早；
- 裂变核能为本报告讨论的内容。

裂变核能的应用形式

- 核电 —— 核电站，空间堆电源；
- 核热 —— 核热站；
- 核动力 —— 船用核动力。

3 我国需要可持续发展的大规模核能

2050年我国能源预测

预测	1991 (*)			2005 (**)	
能源	2050年可采量	相当标煤 (亿吨)	总需求 (亿吨)	相当标煤 (亿吨)	总需求 (亿吨)
石油	1.0亿吨	4.5		5	
天然气	1500亿米 ³			3	
水力	260GWe	6.5		6	
煤	34亿吨	25		25	
其它		3		5	
核电	240GWe	6		6	
		45	45	50	50

*根据国家八六三高技术计划能源领域七五研究资料预测。

**工程院咨询

近年来的规划讨论，会上专家对核电容量的建议：

2020

32~40GWe

（国务院领导决策 **40GWe**运行，**18GWe**在建）

2030

50~?

2050

240~360GWe

因此，我们可以得出结论，我国对核能的需要是大规模的，如何保证实现如此具大的核电容量？

如此大量发展核能，必须发展快堆

1 GWe PWR 60年天然铀用料 t 天然铀

	初装料	年换料	总用料
一次通过	360	142	8880（10000）
无限循环	360	88	5640
快中子增殖堆		0.8~1.0	<60

IAEA-TRS 246, 1985

如果单单发展压水堆，则 **240GWe** 60年共需天然铀 **240** 万吨。

根据中国核工业集团公司科技委课题组调研，**IAEA**统计的**2001年1月1日**世界铀资源情况见下表：

世界各类铀资源总量（万吨铀）

资源分类		开采成本				合计	
		≤ \$ 40/kgU	≤ \$ 80/kgU	≤ \$ 130/kgU	成本 未定		
已知 常规 储量	可靠资源(RAR)	>169.115	251.618	323.782		323.78	447.22
	估算附加资源-I (EAR- I)	>61.106	94.969	123.436		123.44	
待查 明资 源	估算附加资源-II (EAR- II)			233.8		233.80	1293.50
	推测资源(SR)			466.9	592.8	1059.70	
合计		>230.221	346.587	1147.918	592.8	1740.72	

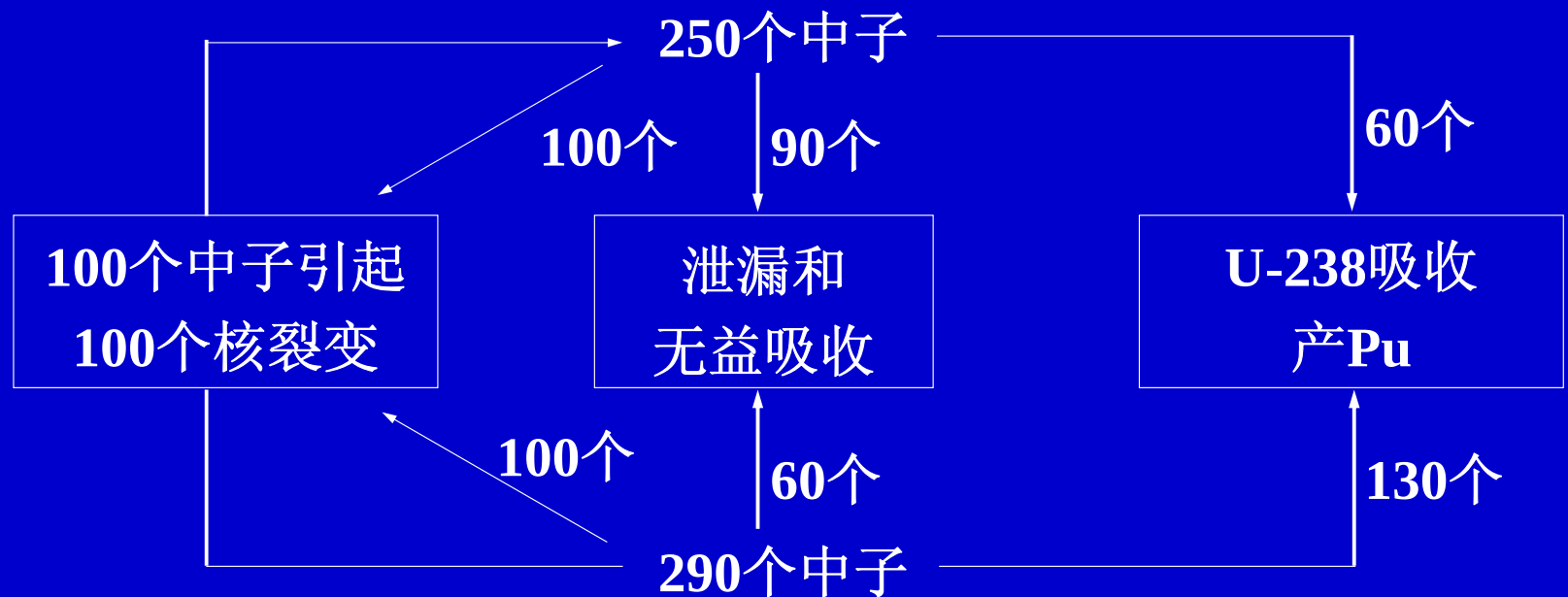
我国核能发展的基本路线是热中子反应堆—快中子反应堆—受控核聚变堆（张华祝副主任：中国核能和平利用，2003.12.03）。

4 开发快中子增殖堆，有效利用铀资源

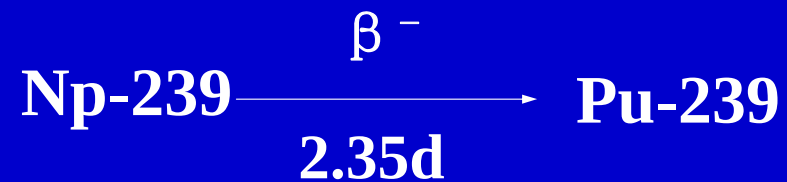
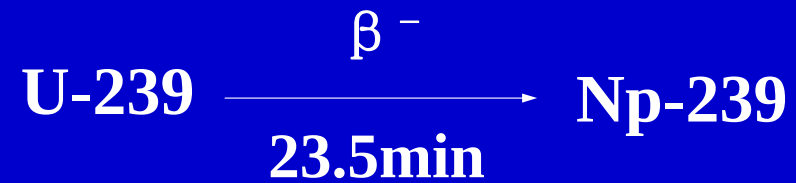
单单发展热中子（压水堆）消耗的天然铀量很大，原因是它主要利用天然铀中只含**0.7%**的铀-235

快堆的特点

PWR—U-235



FBR—Pu



发展不同的反应堆和燃料循环有不同的铀资源利用率。

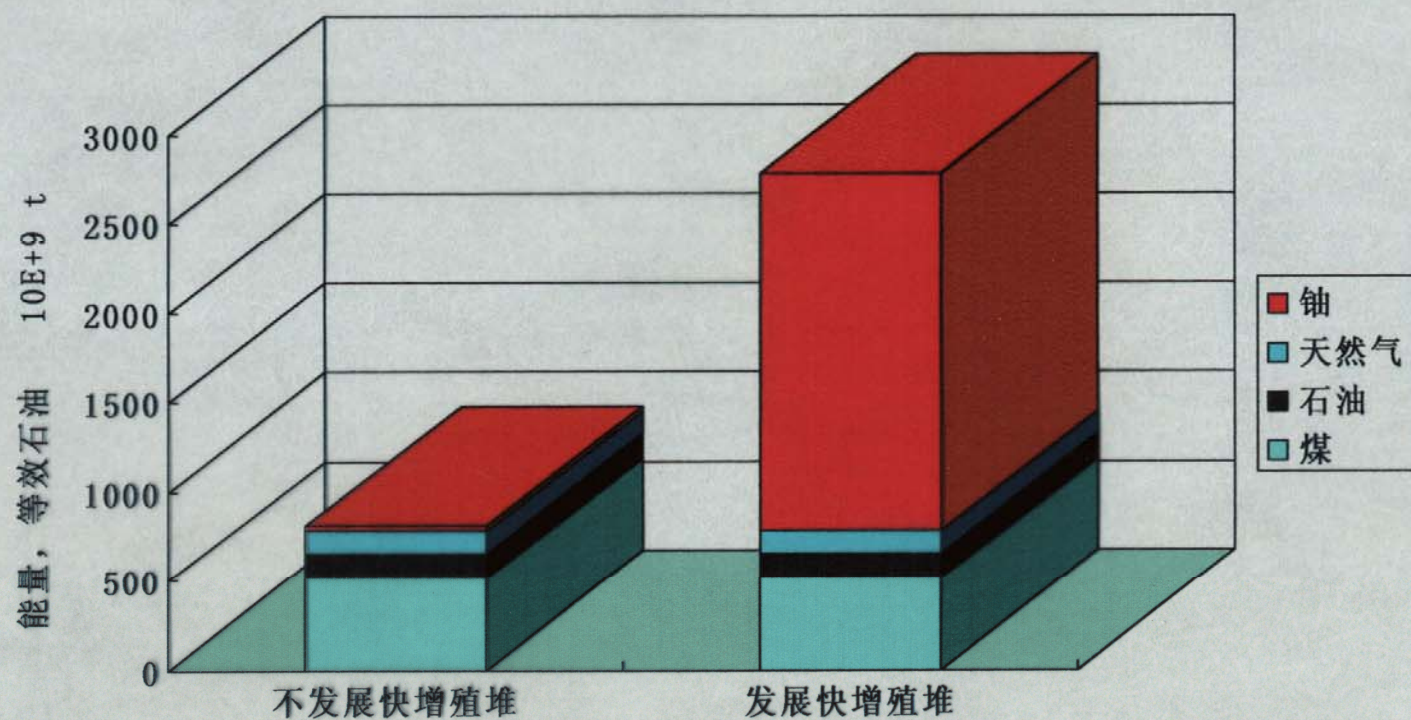
铀资源利用率

发展堆型	燃料循环	铀资源利用率
压水堆	一次通过	~0.45%
压水堆	后处理, Pu, U再循环	~1%
压水堆、快堆	后处理, Pu, U在快堆中再循环	60~70% *

* 由于利用率的提高, 更贫的铀矿也值得开采。这样世界技术经济可采铀资源将提高千倍(参考: IAEA, TRS.246, 1985 Preface)。

所以, 需要大规模核能, 必须发展快中子增殖反应。

世界能源分析



我国技术经济可开采能源比较

- 其 1Q = 1亿吨石油
- 其 1吨煤 = 0.65吨石油
- 其 1000m^3 天然气 = 0.9吨石油
- 其 1吨铀 = 10000吨石油 (PWR, 一次通过)
- 其 1吨铀 = 1750000吨石油 (快堆)

资料来源除天然铀外来自“瞭望”1981第7期

天然气
1.6Q

石油
23Q

煤1105Q

天然铀在快堆中3500Q

天然铀在PWR中20Q

5 如何发展快中子增殖堆

各国快堆工程发展

国家和快堆	功率热/电 (MW)	堆型	冷却剂	燃 料	运行 时间	类别			
						实验堆	原型堆	经济 验证堆	商用堆
美国									
Clementine	0.025/0	回路型	Hg	Pu	1946-52	√			
EBR-I	1.2/0.2	回路型	Na K	U合金	1951-63	√			
LAMPRE	1.0/0	回路型	Na	熔Pu	1961-65	√			
EFFBR	200/66	回路型	Na	U合金	1963-72	√	(√)		
EBR-II	62.5/20	池型	Na	U合金(U,Pu Zr)	1963-94	√			
SEFOR	20/0	回路型	Na	UO ₂	1969-1972	√			
FFTF	400/0	回路型	Na	(Pu,U)O ₂	1980-?	√			
CRBR	975/380	回路型	Na	(Pu,U)O ₂			√		
ALMR	nx840/303	池型	Na	(U,Pu,Zr)(Pu,U)O ₂					√
SAFR	nx873/350	池型	Na	(U,Pu,Zr)				√	

各国快堆工程发展（续）

国家和快堆	功率热/电 (MW)	堆型	冷却剂	燃 料	运行 时间	类别			
						实验堆	原型堆	经济验证堆	商用堆
法国									
Rapsodie	20-40/0	回路型	Na	(Pu,U)O ₂	1967-83	√			
Phenix	653/254	池型	Na	(Pu,U)O ₂	1973-		√		
SPX-1	3000/1242	池型	Na	(Pu,U)O ₂	1985-98			√	
EFR	3600/1500	池型	Na	(Pu,U)O ₂					√
德国									
KNK-II	60/21.4	回路型	Na	(Pu,U)O ₂	1977-92	√			
SNR-3000	770/327	回路型	Na	(Pu,U)O ₂	(1987)		√		
SNR-2	3420/1497	回路型	Na	(Pu,U)O ₂				√	

各国快堆工程发展（续）

国家 和快堆	功率热/电 (MW)	堆型	冷却剂	燃 料	运行 时间	类别			
						实验堆	原型堆	经济 验证堆	商用堆
印度									
FBTR	42/12.5-15	回路型	Na	(Pu,U)C	1985-	√			
PFBR	1250/5000	池型	Na	(Pu,U)O ₂	(在建)		√		
日本									
JOYO	100-140/0	回路型	Na	(Pu,U)O ₂	1977-	√			
MONJU	714/318	回路型	Na	(Pu,U)O ₂	1994-		√		
DFBR	1600/660	双池	Na	(Pu,U)O ₂				√	
CFBR	3250/1300	池型	Na	(Pu,U)O ₂					√
英国									
DFR	60/15	回路型	Na K	U合金	1959-77	√			
PFR	600/270	池型	Na	(Pu,U)O ₂	1974-1995		√		
CDFR	3800/1500	池型	Na	(Pu,U)O ₂				√	
意大利									
PEC	123/0	回路型	Na	(Pu,U)O2		√			

各国快堆工程发展（续）

国家和快堆	功率热/电 (MW)	堆型	冷却剂	燃 料	运行 时间	类别			
						实验堆	原型堆	经济验证堆	商用堆
俄罗斯									
Б P-2	0.1/0	回路型	Hg	Pu	1956-57	√			
Б P-5/10	5-10/0	回路型	Na	Pu,PuO ₂	1958-	√			
Б OP-60	60-12	回路型	Na	(Pu,U)O ₂	1969-	√			
Б H-350	700/130	回路型	Na	UO ₂	1972-98		√		
Б H-600	1470/600	池型	Na	UO ₂	1980-		√		
Б H-800	2000-800	池型	Na	(Pu,U)O ₂	(在建)			√	(√)
Б MH-170	nx425/170	池型	Na	(Pu,U)O ₂					(√)
Б H1600	4200/1600	池型	Na	(Pu,U)O ₂					√
Б H1800	4500/1800	池型	Na	(Pu,U)O ₂					√
韩国									
KALIMER	nx325/130	池型	Na	(U,Pu,Zr)			√		

在核工业部领导下进行了我国快堆基础研究 1965~1986

1968年周恩来总理和李富春副总理特批50kg U-235建零功率装置DF-6发展快堆技术。



东风六号（DF-6）快中子临界装置

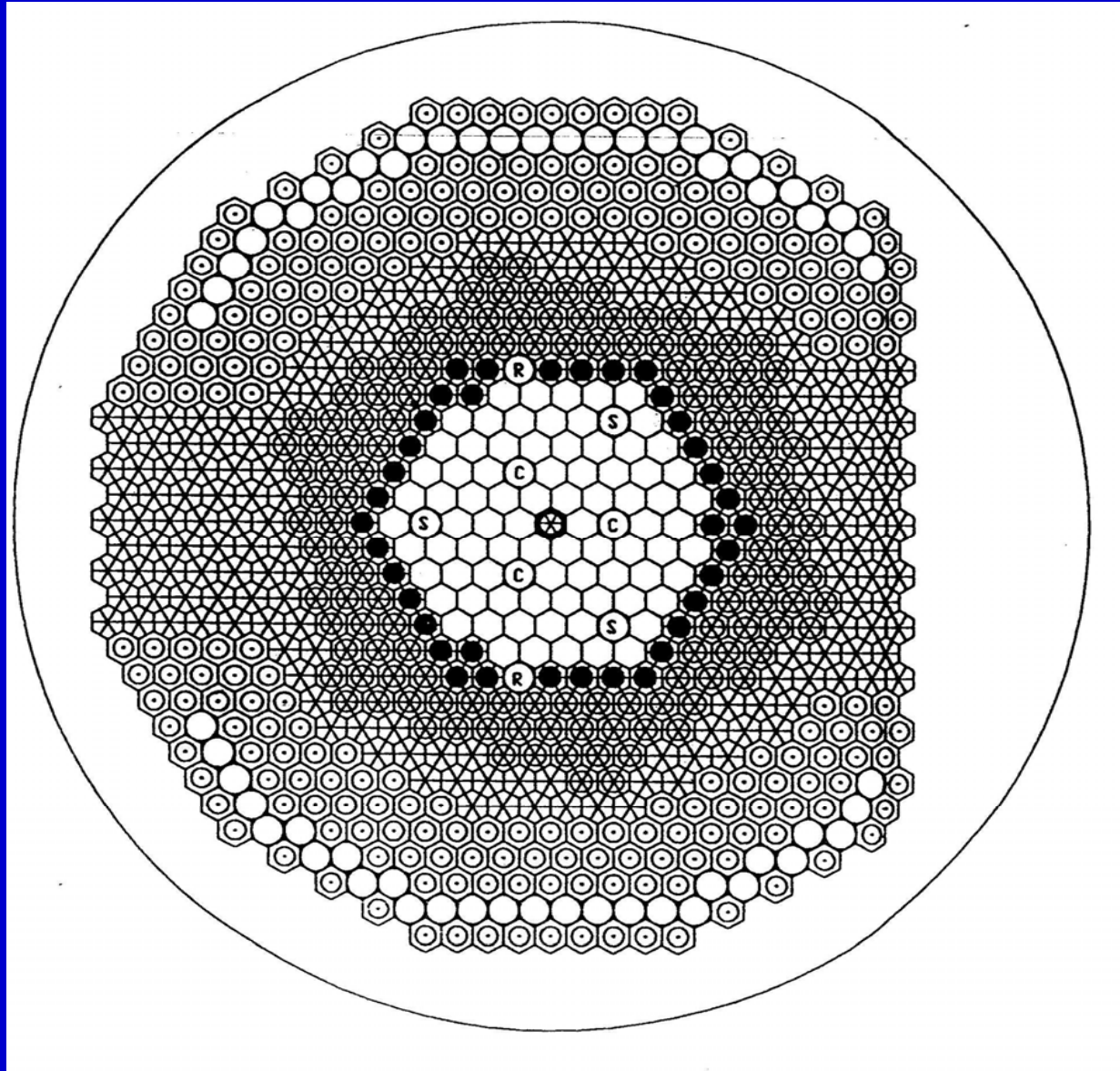
在国家**863**高技术计划，科技部，科工委和中核集团公司领导下进行了我国快堆应用基础研究 **1987~1993**。

我国快堆工程技术发展的第一步

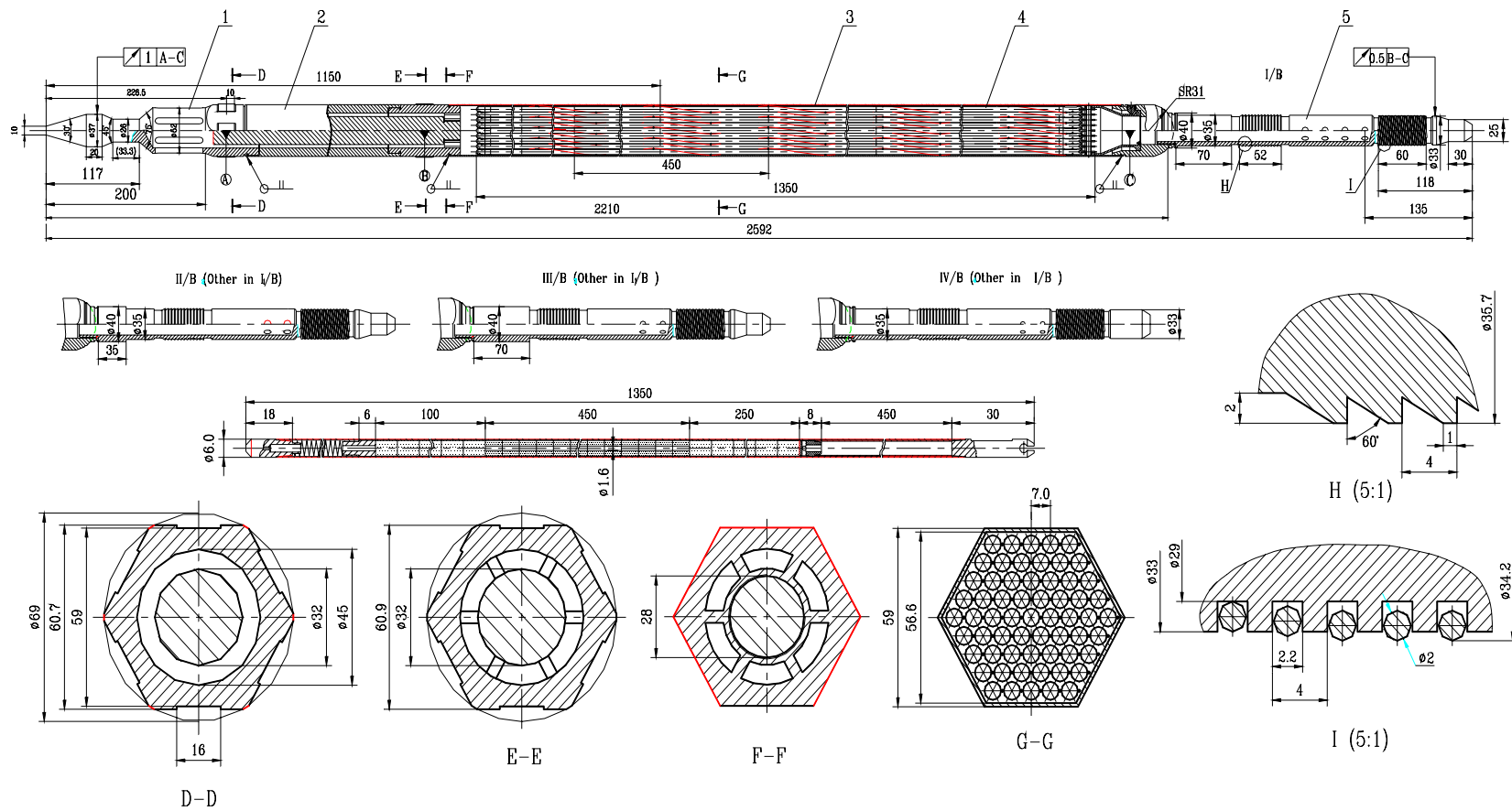
中国实验快堆：

概念设计	1990～1992.07
向俄咨询，优化	1993～1994
初步设计	1995～1997
R&D对法合作	1995～现在
施工设计	1998～2005
建造开始	2000.05
主厂房封顶	2002.08
主容器安装	2005.08
核级钠进厂（250t）	2006.10

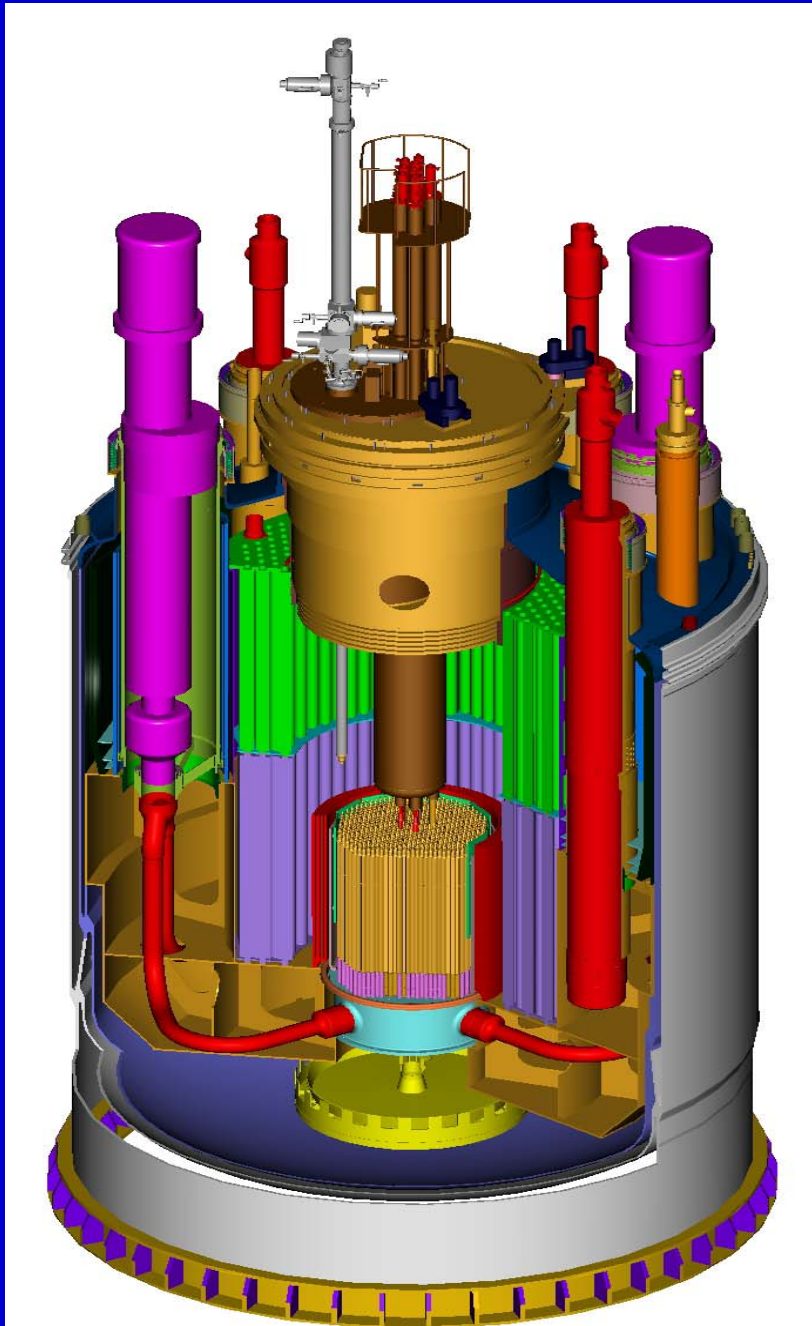
中国实验快堆简介



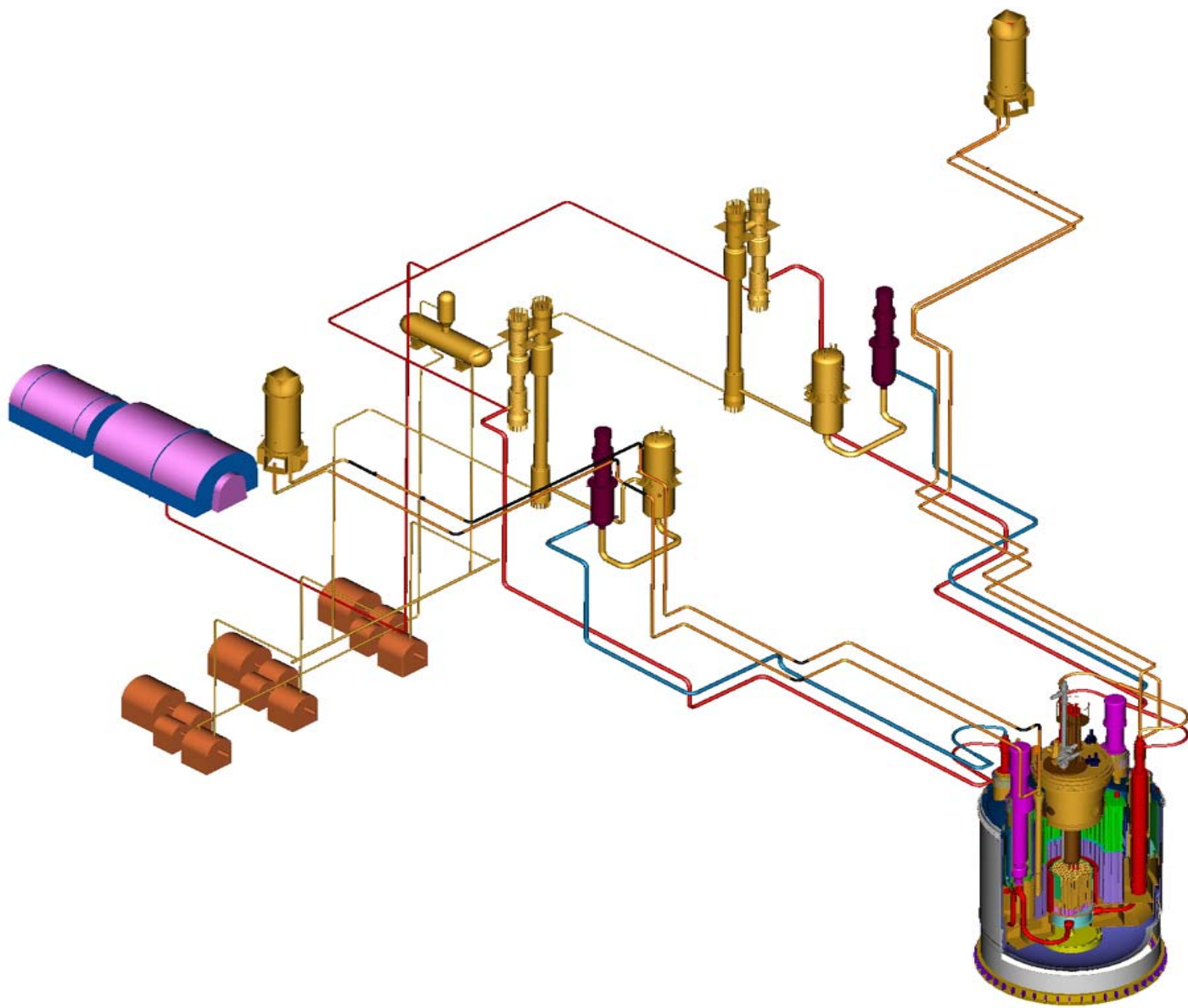
堆芯布置图



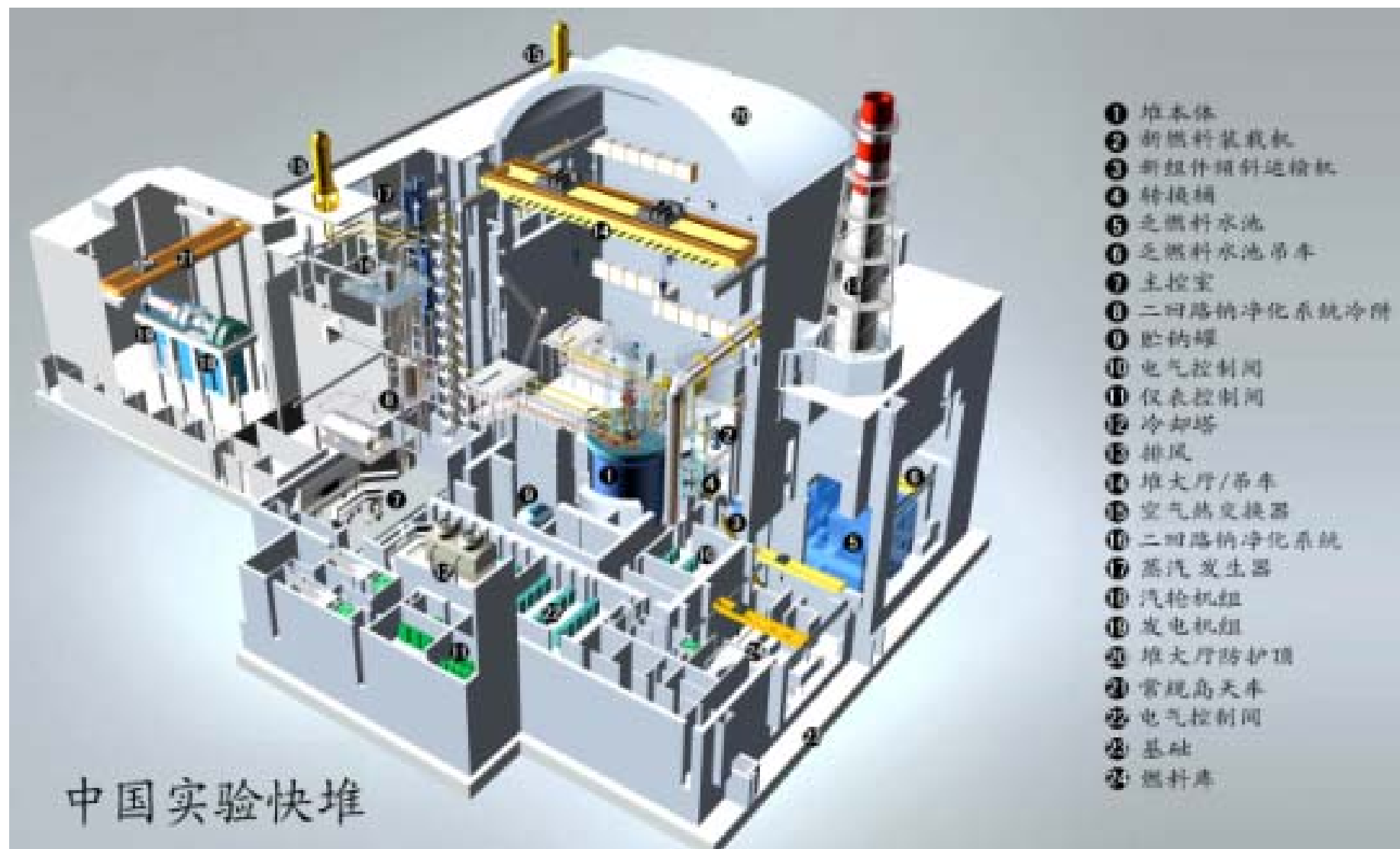
燃料组件



堆本体



主热传输系统



CEFR主要设计参数

项 目	单位	参数
热功率	MW	65
净电功率	MW	20
反应堆堆芯		
高度	cm	45
当量直径	cm	60
燃料		(Pu, U)O ₂
钚, 总量	kg	150.3
²³⁹ Pu	kg	65.76
²³⁵ U(富集度)	kg	42.6(19.6%)
首炉		UO ₂
²³⁵ U(富集度)	kg	236.7(64.4%)

CEFR主要设计参数（续）

项 目	单位	参数
线功率（最大）	W/cm	400
中子注量率	n/cm ² ·s	3.7×10 ¹⁵
目标燃耗	MWd/kg	100
首炉燃耗	MWd/kg	60
堆芯入/出口温度	℃	360/530
主容器外径	mm	8010
一回路		
钠量	t	260
一次钠泵数		2
总流量	t/h	1328.4
中间热交换器数		4

CEFR主要设计参数（续）

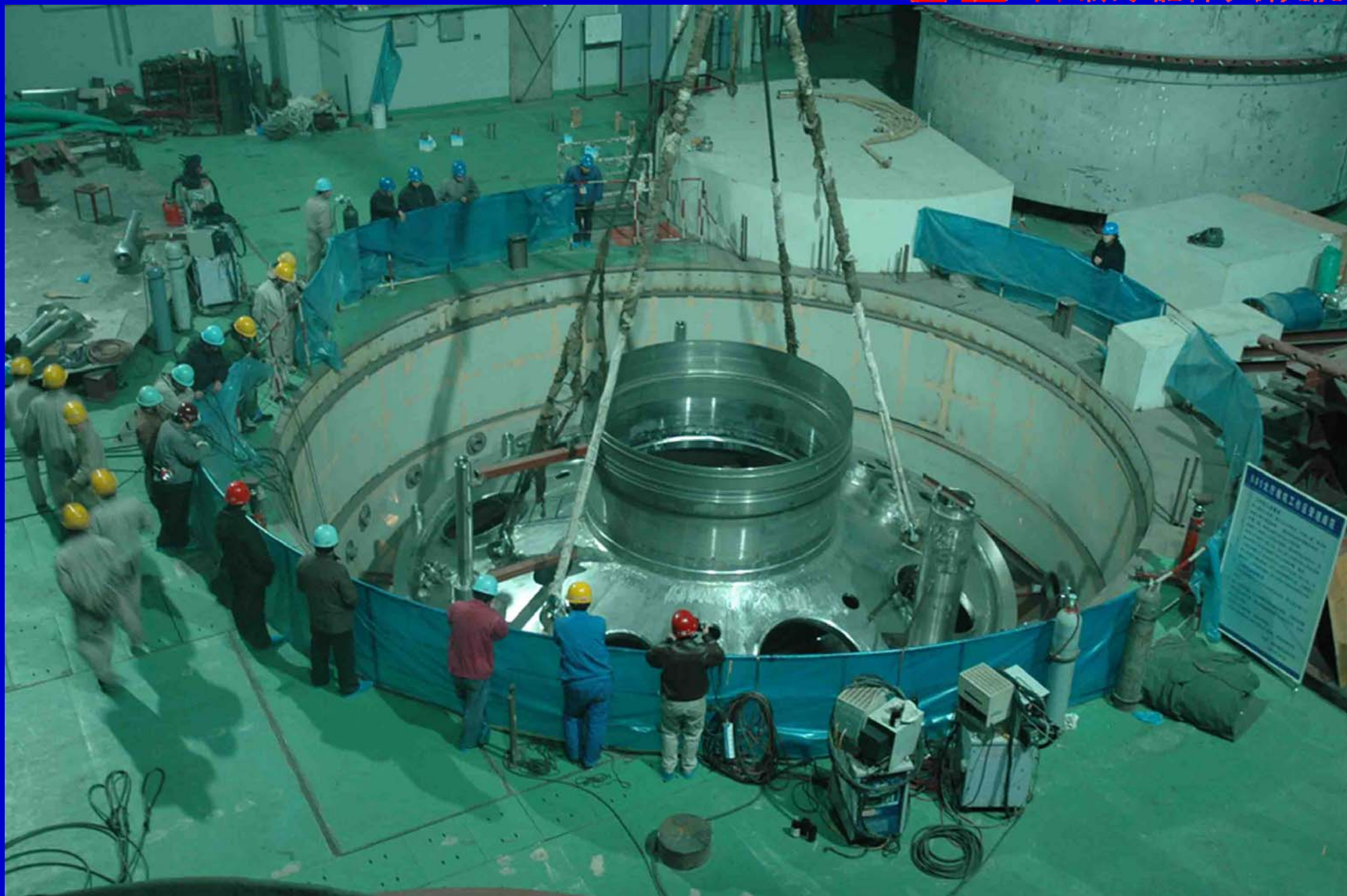
项 目	单位	参数
二回路		
环路数		2
总钠量	t	48.2
总流量	t/h	986.4
二回路		
蒸汽压力	MPa	14
蒸汽温度	°C	480
蒸汽流量	t/h	96.2
设计寿命	A	30



核级钠接收系统



核级钠贮罐



堆容器安装



蒸发器吊装（2005.03）



堆芯组件厂中预装

目前状态:

安装

已完成**1200**台较大设备

管线 **37 Km** (完成**CEFR**的**90%**)

电缆 **642 Km** (完成**CEFR**的**70%**)

>系统80%

调试

已完成**~30%**

计划:

2009年 首次临界

2010年 **40%**并网

2050年我国能源预测

预测	1991 (*)			2005 (**)	
能源	2050年可采量	相当标煤 (亿吨)	总需求 (亿吨)	相当标煤 (亿吨)	总需求 (亿吨)
石油	1.0亿吨	4.5		5	
天然气	1500亿米 ³			3	
水力	260GWe	6.5		6	
煤	34亿吨	25		25	
其它		3		5	
核电	240GWe	6		6	
		45	45	50	50

* 根据国家八六三高技术计划能源领域七五研究资料预测。

**工程院咨询

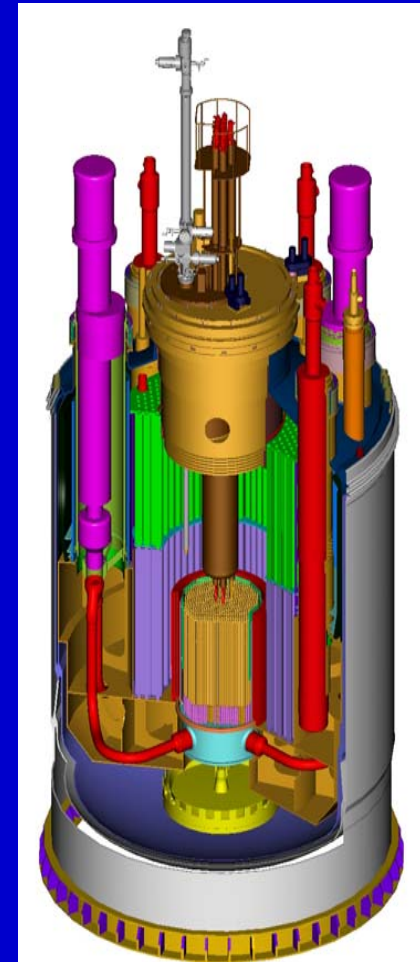
快堆工程发展战略

中国大型高增殖商用快堆

中国原型快堆

1000~1500
MWe

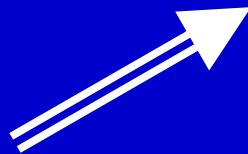
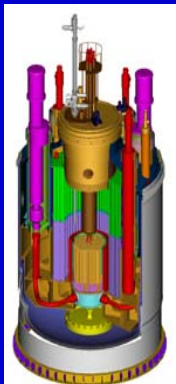
≥ 600
MWe



推广

中国实验快堆

25
MWe



推广

1990

2009

2005~2007

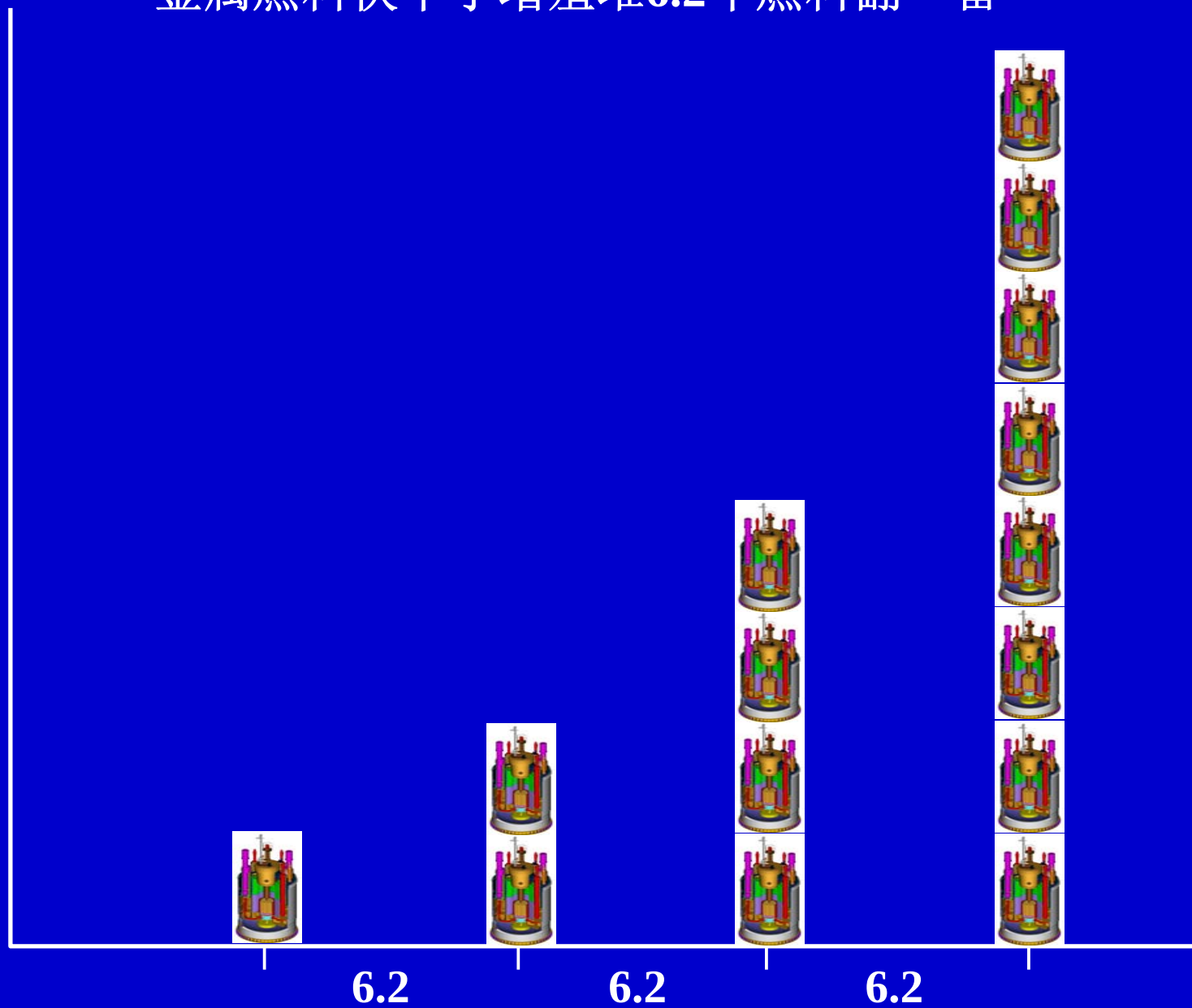
2020

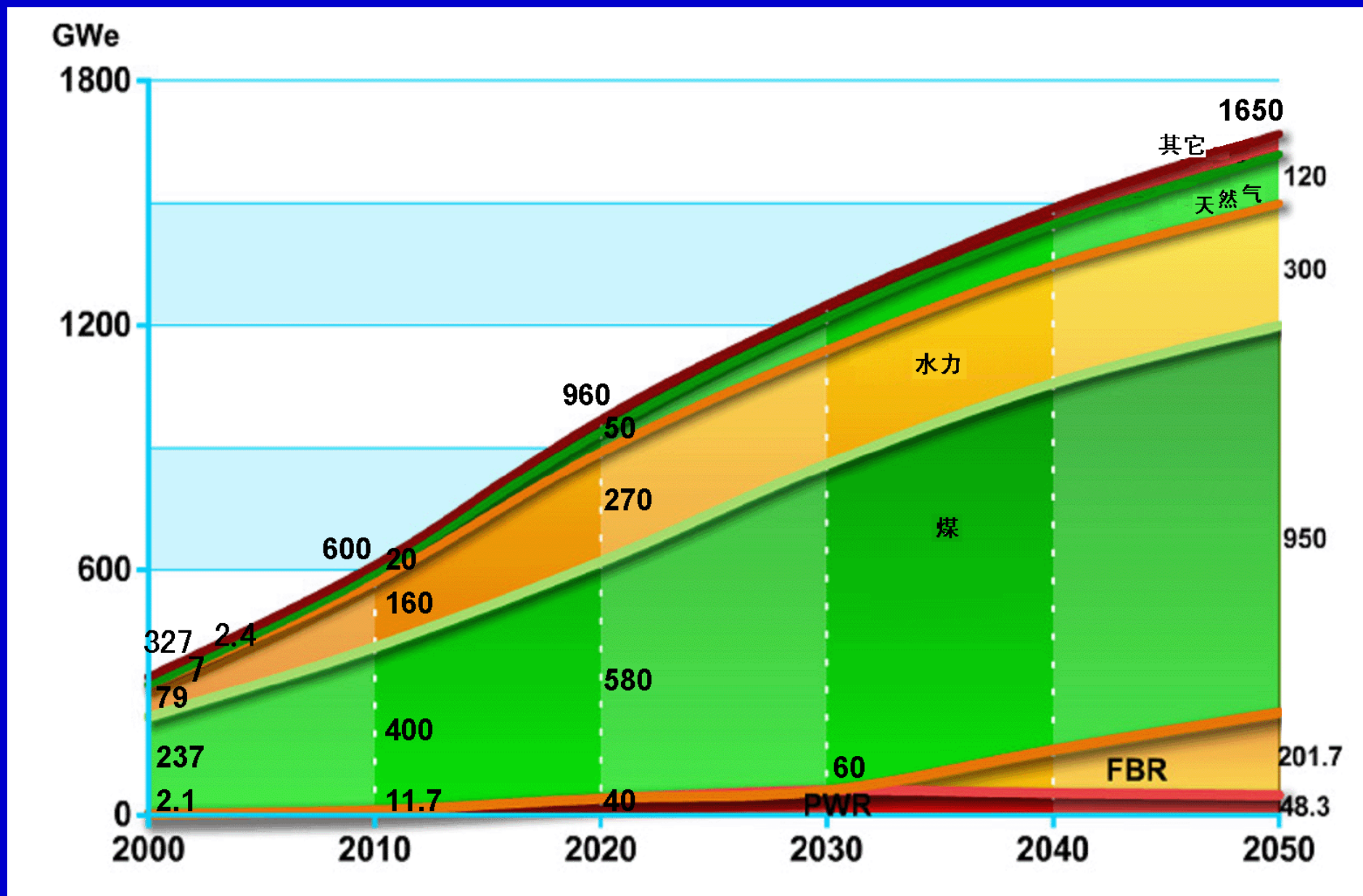
2018

2030

1965 快堆技术基础研究、应用研究、设计验证

金属燃料快中子增殖堆6.2年燃料翻一番





预计的我国电力发展

快堆是解决未来环境问题的关键

我国面临大量使用化石燃料的小环境问题：酸雨、有毒气体、粉尘和大环境CO₂问题：

政府间气候变化委员会报告（IPCC）指出（日本原委会委员长近藤骏介，TIEF-5，2006.6.28～29）：

气温比1850年（工业化前）高1℃，则影响脆弱的生态系统，如珊瑚礁等。

气温比1850年高2～3℃，将在全球范围内影响农业，水资源和人类健康。

气温超过 3°C ，气候就将不再稳定，可能中断深海水的循环。

为此，欧盟制定了长期降低空气温度只比工业化时高 2°C 或更低的目标；日本中央环境委员会于2005年5月也制定了同样的目标。

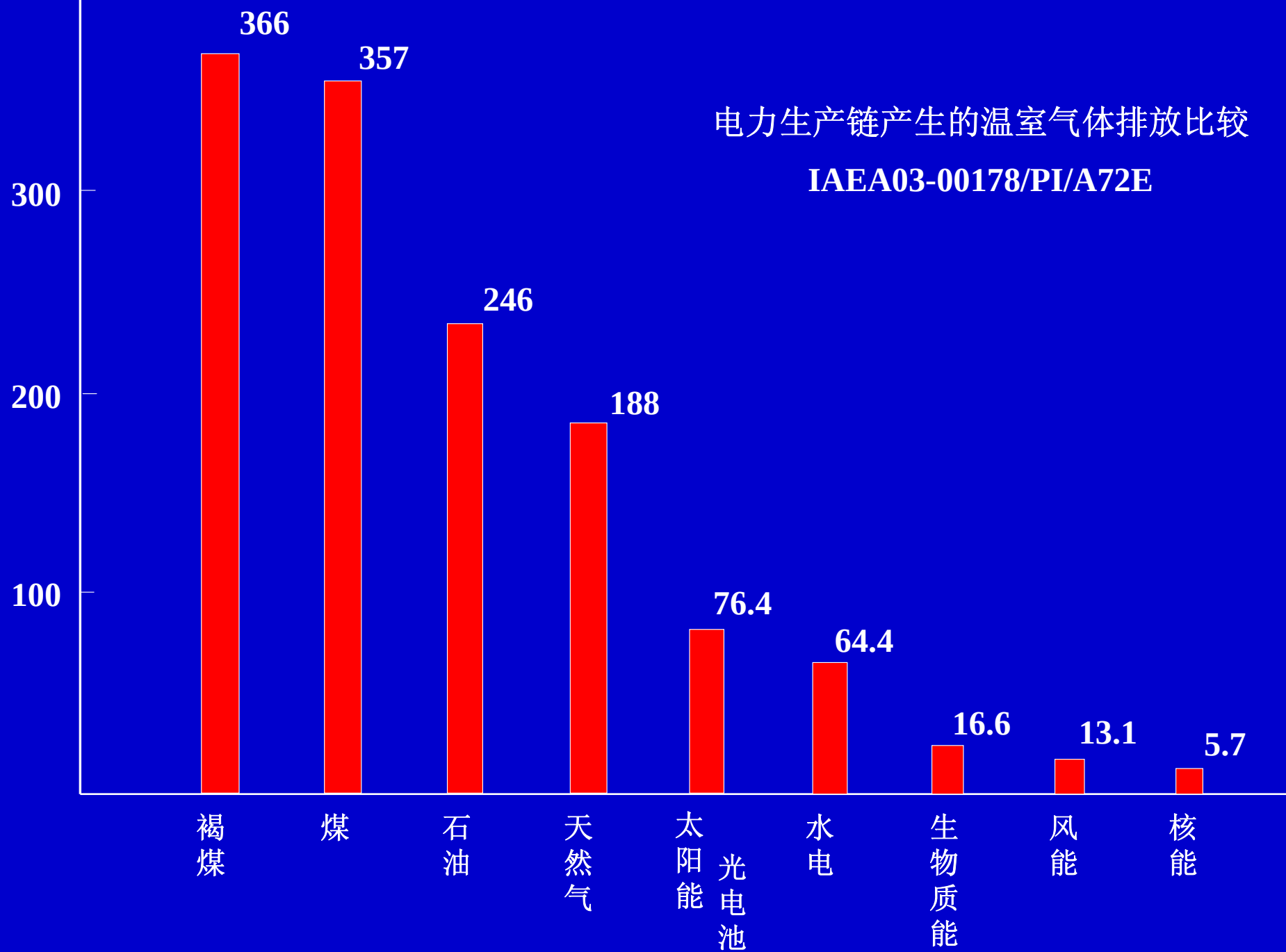
如何实现这一目标 只升不到 2°C ？

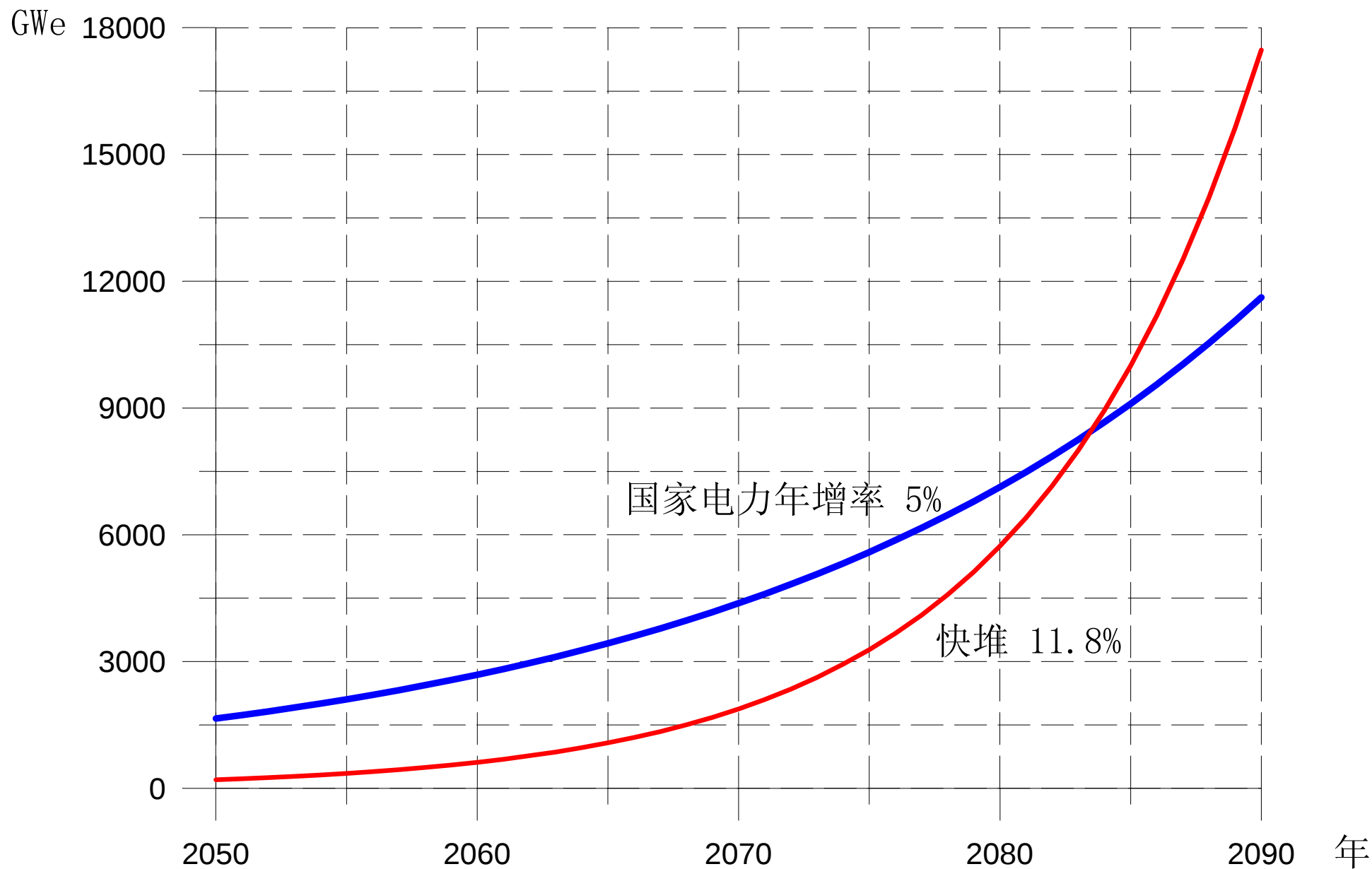
第三个IPCC报告说：要在2050~2100时每年释放 CO_2 的水平要降到现在的一半。

克碳当量/度电

电力生产链产生的温室气体排放比较

IAEA03-00178/PI/A72E





估计的国家总电力装机与快堆总装机的发展

6 结语

国家经济的发展靠各行各业的尽心尽力、通力合作。

我们能源领域要为国民经济的发展和人民生活水平的提高提供可持续的充足的能源。

我们中国原子能科学研究院正在进行我国核能发展总战略热堆—快堆—聚变堆中的快堆技术发展的第一步中国实验快堆最后的安装和调试，并已开始第二步60~90万千瓦示范增殖快堆电站的设计研究，正在为国家提供安全、清洁、经济的可持续核能。为更为光辉灿烂的明天贡献我们的力量。

为了更加光辉灿烂的明天

