

第一部分

全球发电与核电工程的作用

第 1 章 发电与可持续发展

第 2 章 核电在俄罗斯燃料和能源工业中的作用



发电与可持续发展

人类作为生物体只能依靠肌肉力量(约 100 W),并驯养更强壮的动物(称为“马力”的功率测量单位仍然存在: 1 hp=736 W)以代替人力。作为社会性生物,人类将其可支配能量提升了数倍乃至数十倍^[176]。

2015 年明确的人类能源保障(kW/人)如下:

全球平均值	3.0
俄罗斯	7.0
美国	14.0
发展中国家	1.0

1.1 现代能源

目前,人类通过消耗能矿资源(石油、煤炭、天然气、核燃料)生产约 90%的能源。

根据国际能源署(IEA)的数据(IEA,2019 年)^[176],2016 年全球用于发电的能源占比如下:

- (1) 煤/泥炭(38.3%);
- (2) 天然气(23.1%);
- (3) 水力(16.7%);
- (4) 核能(10.4%);
- (5) 油(3.7%);
- (6) 其他(可再生能源,7.8%)。

根据 IEA 的数据,1990—2016 年,全球能源消耗增加了 52%^[190],而全球人口增长了 41%。在这种情况下,人均耗电量增加了 51%。

1990—2016 年,区域能源消耗也有所增长:中东增加了 247%,印度增加了 182%,非洲增加了 108%,拉丁美洲增加了 89%,美国增加了 13%,欧盟 28 个成员国共增加了 3%。

2016 年全球总发电量为 24 937 TW·h(见表 1.1)。

表 1.1 按来源分列的全球发电量

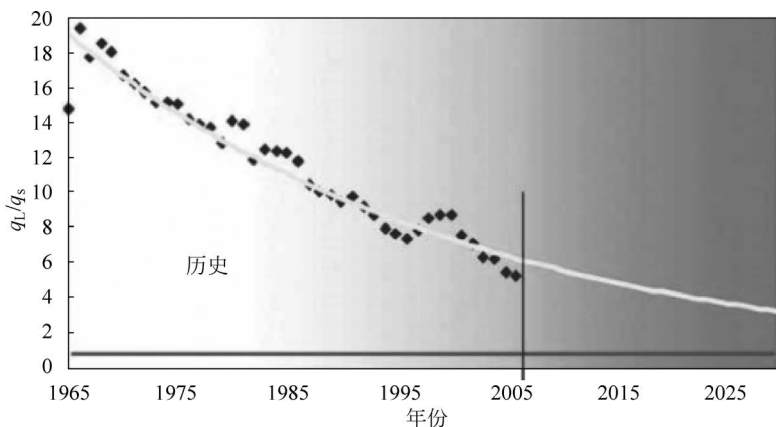
单位: TW · h

年 份	有机化石燃料	核燃料	可再生能源	合计
2000	9960	2591	2900	15 451
2016	16 320	2606	6011	24 937
2000—2016 年的变化	6360	15	3111	9486

1.2 当前能耗增长特性

根据目前的评估,到 21 世纪中叶,全球人口将增长到大约 100 亿。在实行严格的节能措施和保持发达国家与发展中国家目前能源消费比例的前提下,世界能源消费将增长 1.3~1.4 倍。

然而,分析显示^[89],在长时段内维持当前能耗比例的假设是没有根据的(见图 1.1)。

图 1.1 发达国家与发展中国家单位耗电量的比值(q_L/q_s)

考虑到发达国家与发展中国家能源消耗的演变趋势,可以看出,这些群体的相对规模几乎不会随时间而改变,并且在具体的电力消费方面具有显著的趋同性。

20 世纪 60 年代,这些群体的能源消耗量相差 20 倍,2006 年这一差异减小到 6 倍。考虑到发展中国家拥有更大的人口规模和更高的经济增长率,这种情况显然是全球能源市场紧张局势升级的根本原因和持续原因。平衡这些群体的特定电力消耗意味着到 2050 年,能源需求将比目前水平增加 2 倍或 3 倍。

1.3 化石有机燃料

煤炭、石油和天然气燃烧贡献的发电量占全球电力消费的 80%。石油在全球年度总发电量中排名第一,相当于 9.5 Gtoe,其次是煤和天然气。2016 年,全球发

电也主要通过使用化石有机燃料(60%~65%)来实现。在这种情况下,煤炭在火力发电厂的燃料平衡中占据主导地位,其发电量是化石产品发电量的50%。

1. 石油

尽管石油的份额不断减少,但石油仍然是重要的能源资源,其占比为33%^[191]。根据英国石油公司(BP)的数据,2015年全球已探明石油储量约为232 Gt。2014年,全球石油日均消费量约为13 Mt。

俄罗斯(2013年)已探明的石油资源量约为13 Gt。石油年采出量稳定在0.5 Gt(2013年),这些资源还能持续开采25年。

2. 天然气

2015年,英国石油公司估计全球天然气储量为 $1.87 \times 10^{14} \text{ m}^3$ 。根据2015年的开采水平,这些资源可持续开采50年。

俄罗斯(2013年)已确定的天然气可开采储量为 $0.4 \times 10^{14} \sim 0.5 \times 10^{14} \text{ m}^3$;如果其年产量稳定在 $0.6 \times 10^{12} \sim 0.7 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 的水平。这些资源将在60~70年后耗尽。

3. 煤炭

煤炭在全球电力消费中的重要性越来越大,2016年,煤炭占总电力消费的27%。全球煤炭储量估计为1000 Gt(2009年),其开采量稳定在8 Gt/a(2013年)。这些资源可持续开采120年。

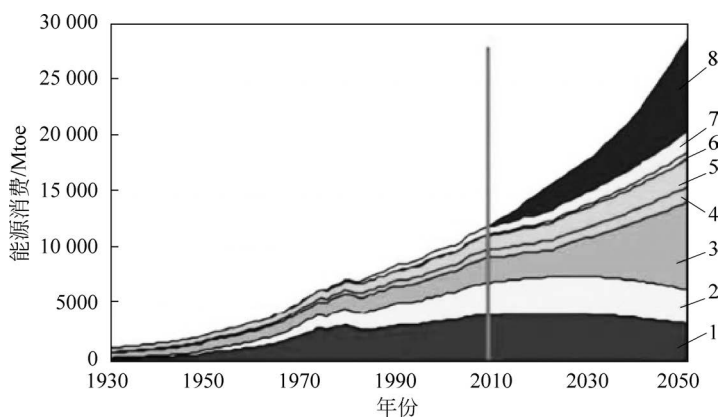
据估算,俄罗斯已探明的煤炭资源总量为150~170 Gt。如果将其开采量维持在0.35 Gt/a(2013年),这些资源将在约400年后耗尽。

1.4 基于有机燃料能源工程的资源限制

20世纪70年代至21世纪20年代末,全球能源消费增长了两倍多,其中2015年超过10 Gt原油当量。

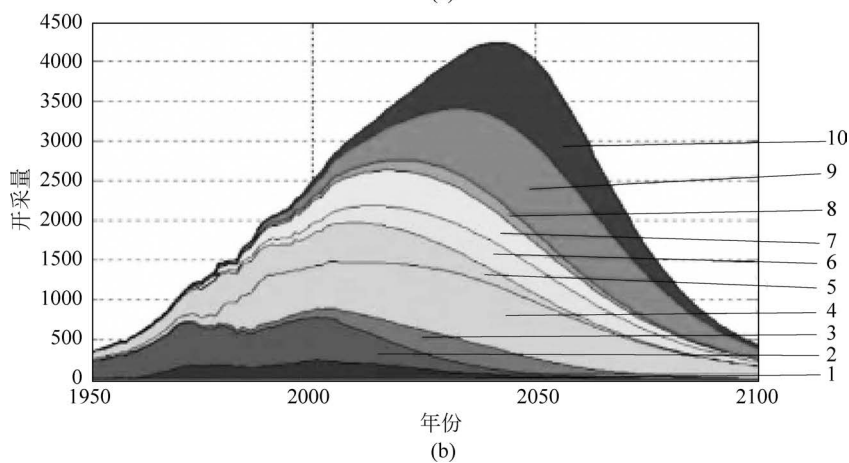
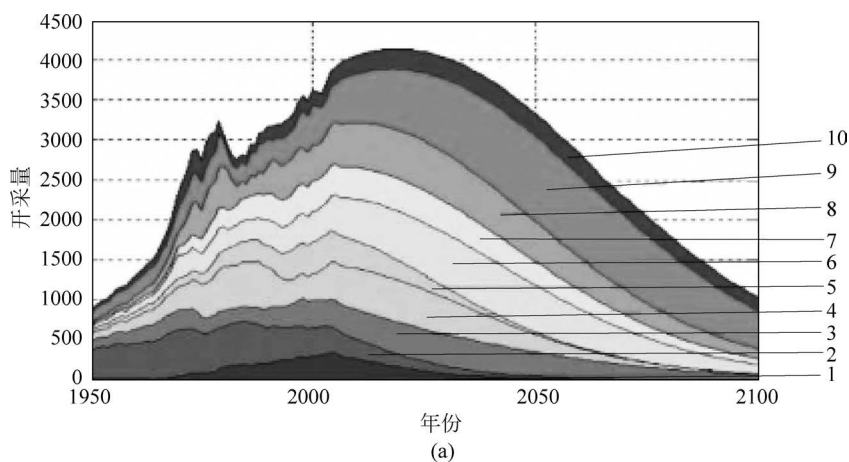
21世纪上半叶对一次能源的估计需求^[89]如图1.2所示,对应于图1.1中用白实线表示的比功耗平衡率。这是最乐观的设想,它假设发展中国家的经济增长将显著放缓,而发达国家的电力消费趋于稳定。

该假设估计,到21世纪中叶,全球煤炭开采量将比2009年增长4倍,生物质和废物的使用量将增加3倍,水电发电量将增加2倍,可再生能源(不包括水电)发电量将增加9倍,核能消费将增加3倍^[89]。尽管能源资源显著增加,但在不久的将来,人们将深刻地感受到电力的不足。未满足需求的区域在图1.2中以深色显示。这一估计与IEA到2030年的预测相符。基本的碳氢化合物(石油和天然气)的预计开采量如图1.3所示。对全球油气开采动态的分析表明,2020—2030年,全球最大规模的有机燃料开采将达到顶峰^[89]。



1—石油；2—天然气；3—煤炭；4—水电；5—生物质和废物；6—其他可再生能源；7—原子能；8—未满足的需求。

图 1.2 通过使用各种主要能源满足能源需求的可能性



1—北美；2—美国；3—南美；4—俄罗斯；5—欧洲；6—非洲；7—亚洲；8—沙特阿拉伯；9—中东；10—伊朗。

图 1.3 21 世纪石油(a)和天然气(b)开采量的估计动态

该预测基于以下假设：这些尚未开采的能源的储量超过已探明的现代资源储量约两倍。截至 2015 年的数据与实际状况相符^[76]。

石油是 21 世纪初全球经济发展的主要能源(见图 1.4)。首先,它是最重要的能源,其次,几乎所有的运输汽车(超过 95%)都使用石油燃料作为能源。能源消费规模不断扩大,有机燃料消费增速超过其资源基数补充增速。到 21 世纪末,仅依靠传统的有机化石燃料利用技术很可能无法满足能源需求。

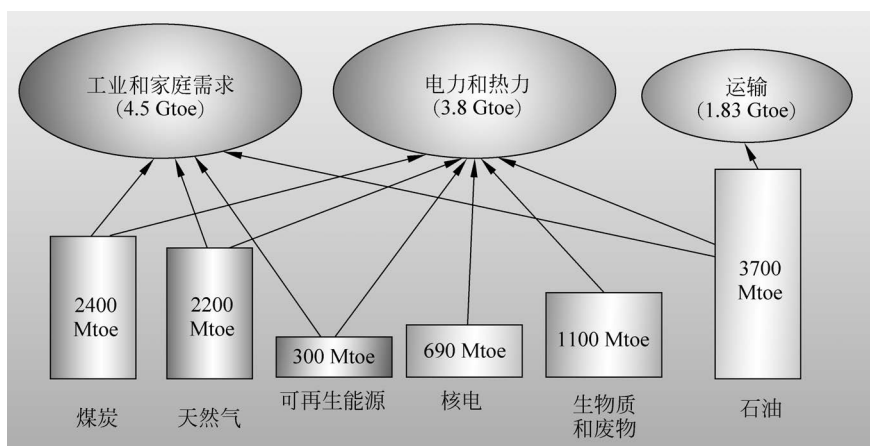


图 1.4 能源消费结构(2010 年)

1.5 基于有机燃料能源工程的环境限制

有机化石燃料的利用方式主要是燃烧,但这也导致每年向大气中释放了大量有害物质。

在俄罗斯,燃料和能源工业设施所排放的有害物质总量占有害物质工业排放总量的 30%以上,占工业温室气体排放量的 80%以上,占氮氧化物排放量的 70%和二氧化硫排放量的 30%。“降雨酸化”“温室效应”等大规模负面环境现象的发展与有机燃料发电有关。

环境安全要求的提高是当前全球能源工程发展阶段所特有的。《联合国气候变化框架公约》的通过和《〈联合国气候变化框架公约〉京都议定书》签署后,各国在各个经济领域,首先是在发电行业实施了限制和减少温室气体排放的措施,成为国家经济发展的一个重要趋势。此外还有其他公约和议定书(如 2015 年《巴黎协定》)陆续出台,旨在推动《联合国气候变化框架公约》的落实,但问题仍未得到根本解决。能源工程的环境安全要求与燃料资源的可获得性和生产的成本效益一样,成为制约经济发展的因素。一些国家已经对污染环境的排放行为进行惩罚,但这尚未成为全世界的惯例,向这一做法过渡不仅能够切实解决环境问题,而且能够从根本上改变所用燃料资源之间的比例。在人类引起的二氧化碳排放总量中,发电行业的相对贡献处于领先地位,并且这些排放物大部分是由煤炭燃烧产生的。

尽管目前零碳发电技术具有明显的环境优势,但当前人们尚未改变基于清洁技术的发电与基于化石燃料的发电比例(见图 1.5)。

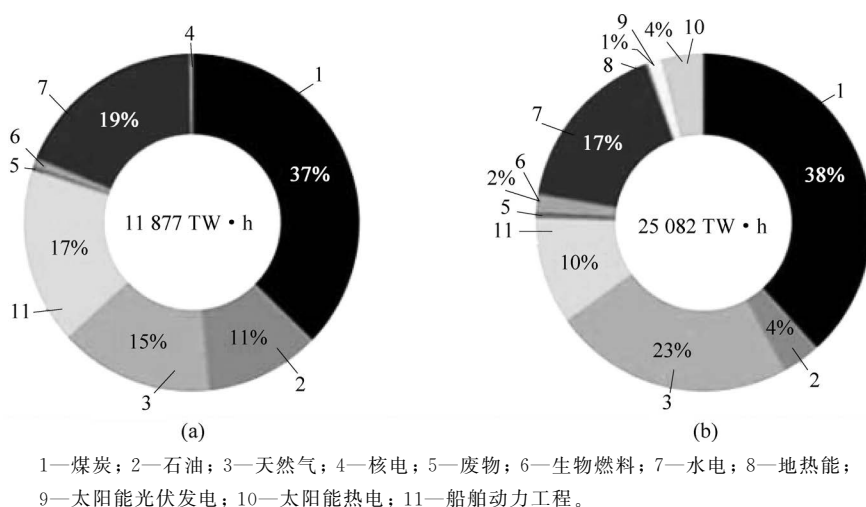


图 1.5 1990 年(a)和 2016 年(b)的全球发电结构

将当前已建立的能源平衡与分析机构过去几年的预测相比较后,人们注意到,关于降低核电份额和保留煤炭与天然气发电主导地位的预测,已被普遍证明真实发生了。与此同时,尽管可再生能源发电的装机容量有所增加(见图 1.6),但是在 2018 年,全球经济发电部门的 CO_2 排放量增长了 1.7%,达到 $33 \times 10^9 \text{ t}$ 的历史峰值。

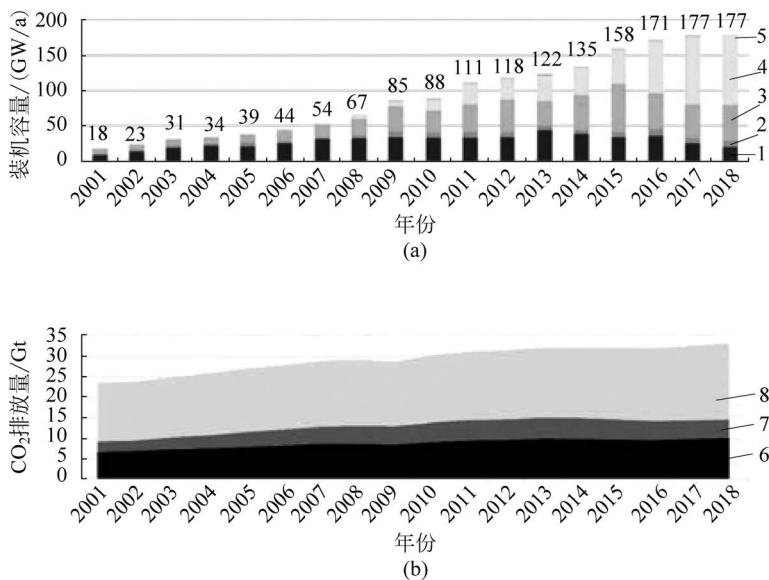


图 1.6 2001—2018 年的可再生能源装机容量(a)和 CO_2 排放量水平(b)

IEA 制定了可持续发展设想方案,旨在大幅减少发电设施的温室气体排放量,主要是尝试从 2018 年开始每年实现可再生能源装机 300 GW,进一步扩大可再生能源占比,从而减少 CO₂ 排放量。但在当前的可再生能源装机规模(177 GW)下,这种方案似乎是不可能被实施的。

值得注意的是,在主要的经济发达国家中,只有法国能够达到人均 4 t 的等效 CO₂ 排放量。大量的核能和一定比例的可再生能源在发电过程中几乎不会留下碳足迹,从而为高水平人均电力消耗的经济发展提供了机会。

1.6 矿物核燃料

1. 核燃料的原料资源

热堆使用天然铀浓缩过程中产生的铀同位素混合物(²³⁵U 和 ²³⁸U)制成的燃料,其中 ²³⁵U 同位素的丰度($cx_5 = x_{\text{nat}} = 0.72\%$)达到 $cx_5 = x_{\text{en}} = 3\% \sim 5\%$ 。这些反应堆的主要能量来源是裂变能(通过热中子反应),主要包括装载入反应堆中的 ²³⁵U 核裂变反应,以及 ²³⁸U 核吸收中子产生 ²³⁹Pu 的过程。其中另一个微乎其微的能量来源是 ²³⁸U 核与快中子的裂变。

为了从天然铀(²³⁵U 的丰度为 $cx_5 = x_{\text{nat}} = 0.72\%$)中生产 1 kg 的核燃料(²³⁵U 的丰度为 $cx_5 = x_{\text{en}} = 3\% \sim 5\%$),需要 $M_{\text{not}} = M_{\text{nf}}(x_{\text{en}} - x_{\text{w}})/(x_{\text{nat}} - x_{\text{w}})$ kg 的天然铀。其中, x_{w} 是浓缩后废铀中 ²³⁵U 的含量。

热堆在运行过程中($BR < 1$),能量由以下“燃烧”产生:

$$M_{\text{fis}} = M_{\text{nf}}(x_{\text{en}} - x_{\text{乏燃料}})/(1 - BR) \text{ kg 可裂变核}$$

其中, $x_{\text{乏燃料}}$ 表示在热堆中的可裂变核素(²³⁵U 和 ²³⁹Pu)的含量。

天然铀在热堆中的使用效率:

$$M_{\text{fis}}/M_{\text{nat}} = [M_{\text{nf}}(x_{\text{en}} - x_{\text{乏燃料}})/(1 - BR)]/[M_{\text{nf}}(x_{\text{en}} - x_{\text{w}})/(x_{\text{nat}} - x_{\text{w}})]$$

在 $x_{\text{en}} = 5\%$, $x_{\text{w}} = 0.2\%$, $x_{\text{乏燃料}} = 1.5\%$, $BR = 0.5$ 的情况下,可以得到以下结果:

$$M_{\text{fis}}/M_{\text{nat}} = (5\% - 1.5\%)(0.72\% - 0.20\%)/[(1 - 0.5)(5\% - 0.2\%)] = 0.7\%$$

2015 年,已探明可回收成本为 80 美元/kg 的天然铀的全球储量为 2.1 Mt,成本为 130 美元/kg 的天然铀的全球储量为 5.7 Mt。如果持续发展以热堆为基础的现代核电(天然铀的利用率极低,约为 0.7%),且它对天然铀的消耗保持在当前水平,那么成本低于 80 美元/kg 的铀资源将在 21 世纪内耗尽。

2. 核燃料增殖

如果只有 ²³⁵U 可以用于发电,那么这样的核能将是短寿命的且很可能是无用的,因为对其进行处置所引发的相关问题比由它带来的好处要多得多。

实际上,自然界中有大量的 ²³⁸U 和 钍-232(²³²Th)可用于生产可裂变核:钷-239

和铀-233(^{239}Pu 和 ^{233}U)。如上所述,可裂变核(^{235}U 、 ^{239}Pu 、 ^{233}U)和增殖燃料核(^{238}U 、 ^{232}Th)的混合物被称为核燃料。

目前,由于核能从核武器发展中继承了铀-钚循环,因此钚没有被用作生产核燃料的原料。此外,现有铀储量充足,而钚的提取因缺乏高品位矿床且工艺复杂而导致其经济性不足。

以 ^{235}U 富集的天然铀为初始燃料的任何热堆都会产生 ^{239}Pu 。但在快中子通量中发生核裂变的反应堆中产生 ^{239}Pu 是最有效的。在这些反应堆中,含有 ^{235}U 达20%的天然铀燃料,或者天然铀与钚的混合物均可用作初始燃料。只有铀-钚燃料具有长期利用的前景,因为如上所述, ^{235}U 的储量相当有限。可裂变的 ^{233}U 核可以在使用铀或铀-钚燃料的反应堆中产生,但需在其堆芯边缘布置钚包层。

增殖比(BR)表征了反应堆内可裂变核数增加的速率与反应堆中可裂变核数减少的速率之间的关系,前者是中子与可裂变核(R^8)的辐射俘获及其随后的 β 衰变的结果,后者是中子可裂变核(R_a^5 和 R_a^9)吸收中子的结果。

$$\text{BR} = R_c^8 / (R_a^5 + R_a^9)$$

因此,通过在反应堆中燃烧 m_{fis} kg的初始裂变材料,可以得到 $\text{BR} \cdot m_{\text{fis}}$ kg的新裂变材料,反过来可以通过燃烧产生 $\text{BR}^2 \cdot m_{\text{fis}}$ kg的新裂变材料得到初始裂变材料。

因此,如果初始裂变材料为 m_{fis} kg,且在乏燃料处理过程中不考虑裂变材料的损失,则可在反应堆中燃烧以下物质:

$$m_{\text{fis}} + \text{BR} \cdot m_{\text{fis}} + \text{BR}^2 \cdot m_{\text{fis}} + \cdots \text{ kg 裂变材料}$$

当 $\text{BR} < 1$ 时,不仅初始裂变材料 m_{fis} 被加载到反应堆中,而且反应堆中的一些(取决于BR值)可裂变材料也可以参与核裂变能量的产生。

$$m_{\text{fis}} + \text{BR} \cdot m_{\text{fis}} + \text{BR}^2 \cdot m_{\text{fis}} + \cdots = m_{\text{fis}} / (1 - \text{BR})$$

当 $\text{BR} \geq 1$ 时,增殖过程能够将所有增殖材料转化为可裂变物质并将之燃烧(减去乏燃料后处理过程中不可避免的损失)。 $[(\text{vef})^{\text{fis}} - 1]$ 的值与装载到反应堆中的可裂变核素的上标值一起对BR起主要作用。

对于热中子($E = 0.025 \text{ eV}$): $(\text{vef})^5 = 2.071$; $(\text{vef})^9 = 2.106$ 。

对于快中子($E = 105 \text{ eV}$): $(\text{vef})^5 = 1.9$; $(\text{vef})^9 = 2.5$ 。

在热中子反应堆中,铀燃料和铀钚燃料的BR均小于1。在压水堆中,BR约为0.5。对于钚-铀循环,在理想的热中子吸收仅发生在燃料中且不存在中子泄漏的理想热堆中,BR仅约等于1.2;在具有该循环的实际工程中,BR仅略高于1。

在快中子反应堆中, $\text{BR} > 1$ 。当使用铀-钚燃料的反应堆时,BR值尤其高。在快堆中,中子谱比裂变谱柔和得多,根据燃料成分的不同,BR在1.1~1.6的范围内。

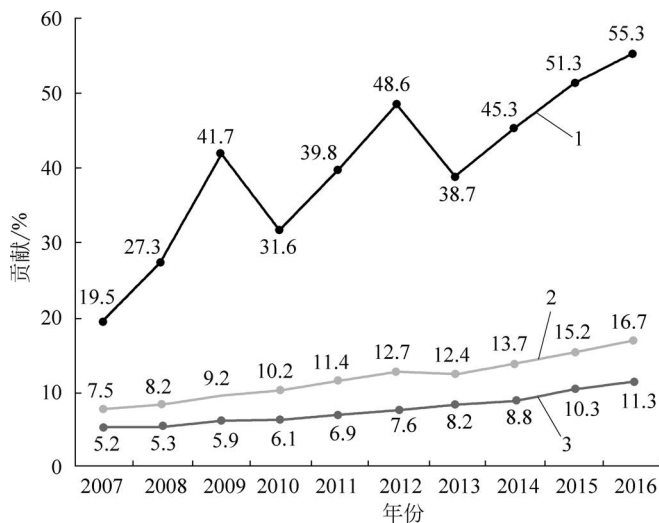
目前,能够在核燃料循环中使用 ^{235}U 和几乎所有 ^{238}U 的快堆具有可持续数百年甚至一千年以上的燃料储备(见表1.2)^[25]。

表 1.2 电力工程的“魔法皮肤”(2010 年)

燃料	全球			俄罗斯		
	储量(已确定可开采)/(GW·a)	利用强度/GW	耗尽期/年	储量(已确定可开采)/(GW·a)	利用强度/GW	耗尽期/年
石油	200 000	4600	40~50	10 000	400	20~30
天然气	150 000	2200	60~70	46 000	550	80~90
煤	1 000 000	3000	100~200	110 000	170	400~500
热堆核设施	90 000	750	120	9000	45	200
总计	1 440 000	11 000	130	175 000	1200	150
快堆核设施	15 000 000	11 000	1500	1 500 000	1200	300

1.7 可再生能源

近几十年来,可再生能源的增长速度发生了重大变化。可再生能源在全球总发电量中的份额逐渐增加^[43](见图 1.7)。根据 IEA 的估计,为满足日益增长的需求,到 2035 年,全球发电行业新建装机容量的 50%将来自可再生能源,其中主要是水电和风力发电。



1—可再生能源对总装机容量增长的贡献；2—总装机容量的份额；3—总发电量的份额。

图 1.7 2007—2016 年可再生能源对全球装机容量和发电量动态的贡献

根据彭博新能源财经的数据,不考虑大型水电

水电对全球发电的贡献保持在 15% 的水平。除大型水电项目外,可再生能源在发电中的份额可能将从 2009 年的 3% 增加到 2035 年的 15%。中国和欧盟的份