

核动力在重油开采和改质方面的应用

核动力厂用作石油工业热源概述

Hernán Carvajal-Osorio

提高重油采收率的热采法，已成为一种公认的方法。虽然这种方法主要用于二次和三次采油过程，但在常规方法不起作用的油田中，也用于一次采油过程。人们还常常研究用核反应堆作采油热源的问题，尽管许多研究得出的结论是核方案在经济上颇有吸引力，但从未实际应用过。

核动力的应用问题已经超出了纯经济学的范围。首先，重油采收所要求的温度和压力条件，往往比目前发展水平和商业化水平最高的核反应堆，即轻水和重水冷却的反应堆所能达到的还高。对任何一个可采油田来说，当打算以核动力厂作热源时，即使最初的状况不是这样，当考虑开采更深的重油地层和输热管线在油田内伸展时，这个问题就会出现。其次，石油市场继续很不稳定，因而周期长、资本密集的项目所具有的风险往往让人无法承受。此外，最近开发了一些大型、常规的石油矿藏，例如阿拉斯加油藏和北海油藏，并且可从石油输出国组织（OPEC）和其它国家以合理价格得到充足而持久的石油供应。这些都使得目前不需要广泛开发重油资源。第三，与核动力有关的一些老问题，即安全、废物处理、燃料供应和公众认可等问题，继续困扰着核电工业，给新领域中核企业的建立带来了不利的气氛。

不过人们普遍认为，这些与使用核动力有关的不利因素，大多会随着有限的常规石油资源的枯竭而逐渐消失。鉴于重油采收及其随后的改质过程都是一些能源密集的过程，可知核动力会因其独特之处而成为

一种能在未来起重要作用的、理想的热源候选者。

重油的热力法采收及改质

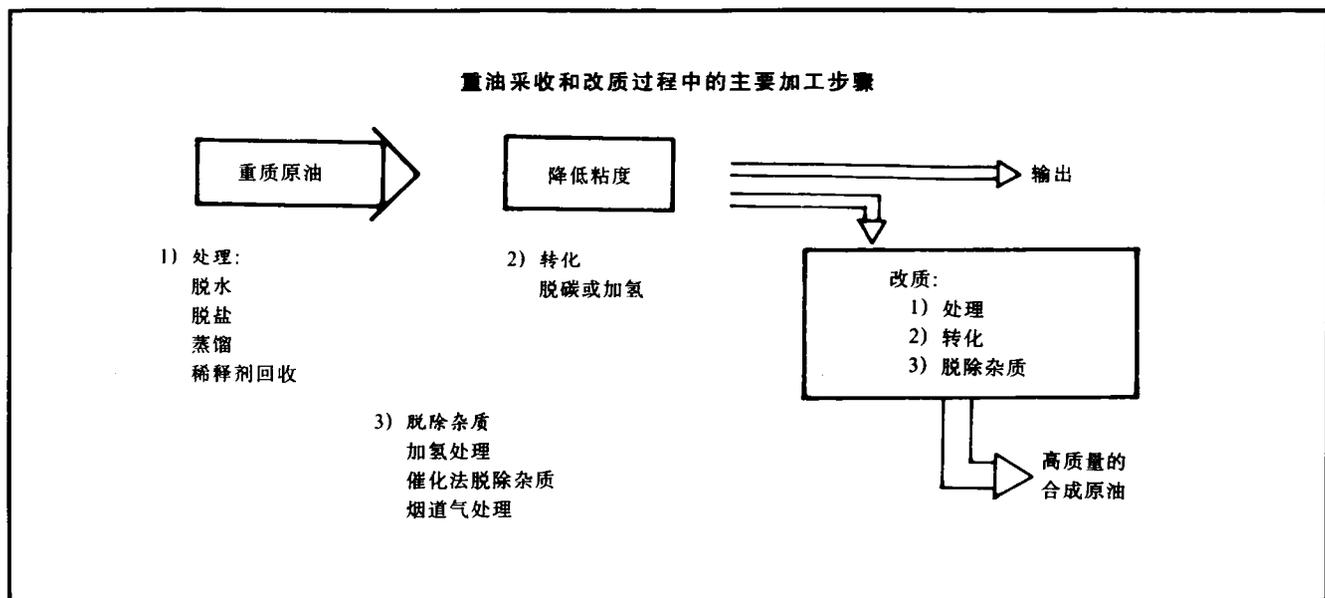
石油的热力采收所使用的主要方法有：注热流体（主要是热水），以浸泡和驱替方式注蒸汽，以及就地火烧油层。其它如注热气体和井下设置蒸汽发生器等方法，用得很少。

除热采方法外，其它的方法，例如注水、注气（主要是空气和 CO_2 ）和注化学添加剂，以及微生物法、电磁加热法、泡沫添加法等，也多多少少地用于二次和三次原油采收。这些方法的效果随油田的具体条件而异。在热采或非热采条件下添加稀释剂的做法，正在日益广泛地被应用，因为它能够大大减少原油驱替过程所需的能量。

在强化石油采收（EOR）的各个领域中，热采法都是用得最多的。* 例如，1988年美国的全部EOR工程项目中，石油产量的73%是用热采法生产的；委内瑞拉是西半球中第二个最大的EOR使用者，几乎百分之百地使用热采法；印度尼西亚则是另一个重要的EOR使用者。注蒸汽是优先的一种热采方法，因为它简单，成本比较低，已成功地用于目前的一些工程项目。

* EOR (enhanced oil recovery) 一词通常是指为了额外生产大量石油而必须给油藏添加能量的情况。不包括从未生产石油或石油不能靠自然压力流出的油藏，或必须加热才能泵吸的油藏。除热采法外，EOR还包括任何一种可给油藏添加能量的方法。

Carvajal-Osorio 先生是设在加拉加斯的委内瑞拉科学研究所物理中心的核工程师。



用于注入油层的蒸汽的温度和压力条件，取决于油藏的特点（例如深度和渗透性）和原油的性质（例如粘度和比重）。对于深度为 500 至 1000 米的油藏来说，常用的温度为 350 °C 左右，压水介于 12 至 17 兆帕 (MPa) 之间。对更深的油藏来说，虽然改善油井的保温状况和使用温度和压力更高的蒸汽可以开采深部的油藏，但注蒸汽的效率仍然降低。

在超重油和沥青的开采和从油砂和油页岩提炼石油的过程中，热采方法是唯一的选择。* 重油和沥青在采收后，必须进行改质，脱除杂质和提高氢/碳比，以便在随后的常规精炼过程中制得质量更高的产品。在重质原油中，硫和金属（如钒和镍）的浓度通常相当高。

重油的开发和利用过程，包括若干个工艺步骤。（见附图。）虽然脱碳或加氢方法都能用于提高重油的氢/碳比，但加氢法对提高石油转化率和增加轻质馏分的产率更有利。当然，加氢过程意味着要消耗

相当大量的氢，制氢又要消耗大量能源。

关于重油的开发成本，除了委内瑞拉声称其重油开采成本约为 5 美元/桶外，一般报道的重油开采和油砂处理的成本介于 9 和 15 美元/桶之间。* 此外，改质过程可能还要加上 10 美元/桶或更多的额外费用，这取决于各工程项目的具体情况和原油需要处理的程度。

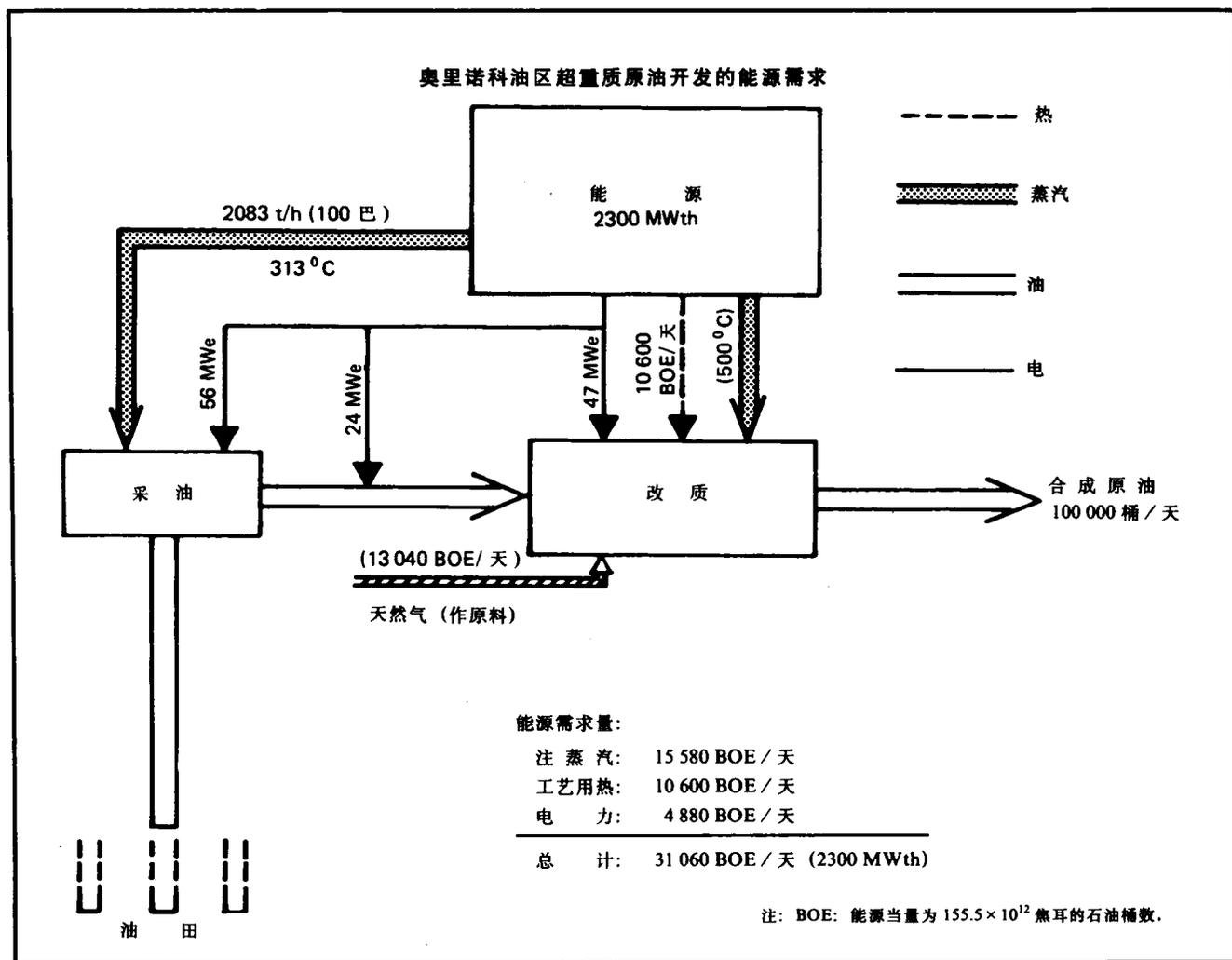
美国能源部最近进行的研究得出结论，如果到 2000 年石油价格逐步上涨到 40—50 美元/桶，则美国额外的重油产量就会达到 19.4×10^9 桶，约为 1985 年全年重油产量的两倍。然而，同一研究也表明，如果石油价格只从目前的 12 美元/桶增加到 2000 年的 21 美元/桶，那么使用热采法强化石油采收的石油产量，就会从目前的 500×10^3 桶/天开始下降。该研究还得出结论，如果石油价格的年上涨率保持 5%，到 2000 年达到 36 美元/桶，那么热采法的产量到那时就会达到 1×10^6 桶/天，其中靠就地火烧油层法增产的数字最大。

重油的资源状况和开发中的能源消耗

据估计，全世界重要的重质原油储量为 2×10^{12} 桶，其中委内瑞拉约占 72%；其它国家（主要是苏

* 至于重油与沥青的区别，1982 年举行的第二届 UNITAR（联合国训练研究所）会议曾作出规定：当石油在油层温度下的粘度小于 10 000 厘泊 (cp) 时，被认为是原油；大于 10 000 cp 时，叫做沥青。对于原油来说，当其比重小于 10 ° API（美国石油学会制订的比重指数）时，叫做超重原油；当比重介于 10 和 20 ° API 之间时，叫做重质原油；当比重大于 20 ° API 时，叫做普通石油。所有比重都应在 15.6 °C 的条件下测量。

* 1 桶等于 0.159 立方米。



联、美国和伊拉克) 各占 10% 以下。

众所周知，加拿大拥有大量主要为沥青类的油砂矿，相当于含有 2.95×10^{12} 桶石油，比全世界重油总储量还多。加拿大的油砂矿储量约占世界总储量的 82%。在这个总储量中，用已知技术估计可采收约 5×10^{11} 桶重质原油和 2×10^{11} 桶沥青。

苏联的重质原油和沥青矿资源估计为 2×10^{12} 桶，其中 0.5×10^{12} 桶可看成储量。苏联目前重质原油的产量很低，只有 25 000 桶/天。

油页岩矿也含有大量的碳氢化合物。在油页岩中，原油不是以液体形式存在，而是以油母质形式含于页岩内。把油页岩加热至 370°C 左右，油母质即分解为较轻的“页岩油”，其产率为 40—400 升/吨。目前，油页岩的具体储量尚不清楚，但相信数量很大，而且分布于世界各地，其中美国和苏联最多，中国与巴西也有大量产出。单在美国，可采收的页岩

油估计可达到 1×10^{12} 桶。

在重油和其它非常规石油资源的开发中，如同在任何能源密集型活动中那样，能源循环的经济学是很重要的。如果不充分注意这个能源问题，就可能给能量资源造成惊人的浪费，造成相当大的环境影响，甚至可能导致负的净能量平衡（考虑所有的过程）。

目前重油项目的能源消耗，约占所产石油能含量的五分之一（如印度尼西亚的情况那样）至三分之一（在消耗较大的项目中）。这些数字只涉及重油开采过程。如果把改质过程包括在内，也就是说在重油开发的一体化模式中，也许要消耗掉所产石油的 40—50%。这个百分数的大小，主要取决于油田条件和原油的特性。原油加氢处理是改质过程的一部分，为此需要制氢。因为它是整个过程中消耗能量最多的一步，因而要给予专门的考虑。制氢的方法有好几种，最常见的是水的电解法和甲烷-蒸汽重整法。

甲烷-蒸汽重整法是最经济的，它利用天然气和其它碳氢化合物作原料。

作为一个实例，对委内瑞拉的奥里诺科石油区超重质原油的开采和预处理的能源需求，进行了估算。这是一种需要较多处理的实例。（见附图。）如果把作为制氢原料使用的天然气也包括在内，则能源输入总量约占所产石油的能量当量的 44 %。

用注蒸汽法开采重油的能源消耗，通常用油/蒸汽比（OSR）度量（有时用其相反的比率度量），单位为桶石油/吨蒸汽。对提高能源经济性和降低成本来说，该比值越高越好。为了注蒸汽，将相同的部分生产井改作注入井。在某些情况下，一开始是间隙式注入蒸汽，只要足以提高石油产量就够了。这个阶段叫做“浸泡生产”阶段。当油田产量开始大幅度下降时，就改用连续注蒸汽方式，直至油田的开发变为不经济为止。这个阶段叫做蒸汽驱油阶段。从“浸泡”阶段转入“驱油”阶段后，注入蒸汽的需求量猛增至最大值，从而使 OSR 大大降低。浸泡阶段的 OSR 数值通常为 25 桶/吨，而在蒸汽驱油阶段降为 5 以下。在美国，在使用烧化石燃料的常规方法生产蒸汽的情况下，EOR 项目的 OSR 值大于 1.6 桶/吨时被认为是有利可图的。

核动力在重油采收中的应用： 过去的研究和当前的技术水平

在开发核辅助重油采收技术的过程中，必将在工艺的改造和最优化方面遇到一些新的技术课题。所面临的主要课题有：蒸汽的大规模生产并在较高的温度和压力下输送，大量生水的廉价处理，地面稳定性问题，以及多用途核动力厂运行方式的最优化等。此外，各个油田的特性和石油的性质往往不同，使得所需的蒸汽量和蒸汽条件也不相同。油田的生产时间可能比反应堆寿命短，这也是面临的一个新问题。

在涉及的各种因素中，有许多因素不利于核动力厂的设计和建造的标准化，不利于降低成本。当然，核蒸汽供应系统和动力厂的其它设备，也许仍然能够实现某种程度的标准化。

加拿大就利用坎杜（Candu）堆问题所作的一项研究，相当细致地讨论了核动力在使用注蒸汽法从油砂中采收重油领域的应用问题。在进行此项研究的当时（1980 年），与靠烧煤生产蒸汽相比，估计可节约费用 25—50 %。还提出过一种用有机物质冷却的

坎杜堆方案，以便用于深度大于 650 米因而需要较高蒸汽压力的油砂矿。然而，正如前面指出的那样，尽管轻水堆和重水堆都有一些优点，但对于采收深部矿的石油来说，这些反应堆所能提供的温度和压力都不够。

1981 年，联合王国的通用电气公司曾提议把镁诺克斯（Magnox）反应堆用于重油采收。这种反应堆用天然铀作燃料，建造时使用不很高级的材料，对一些国家尤其是发展中国家很有吸引力。然而，它也有不利的一面，主要是反应堆铀资源的利用率较低，产钚率较高。

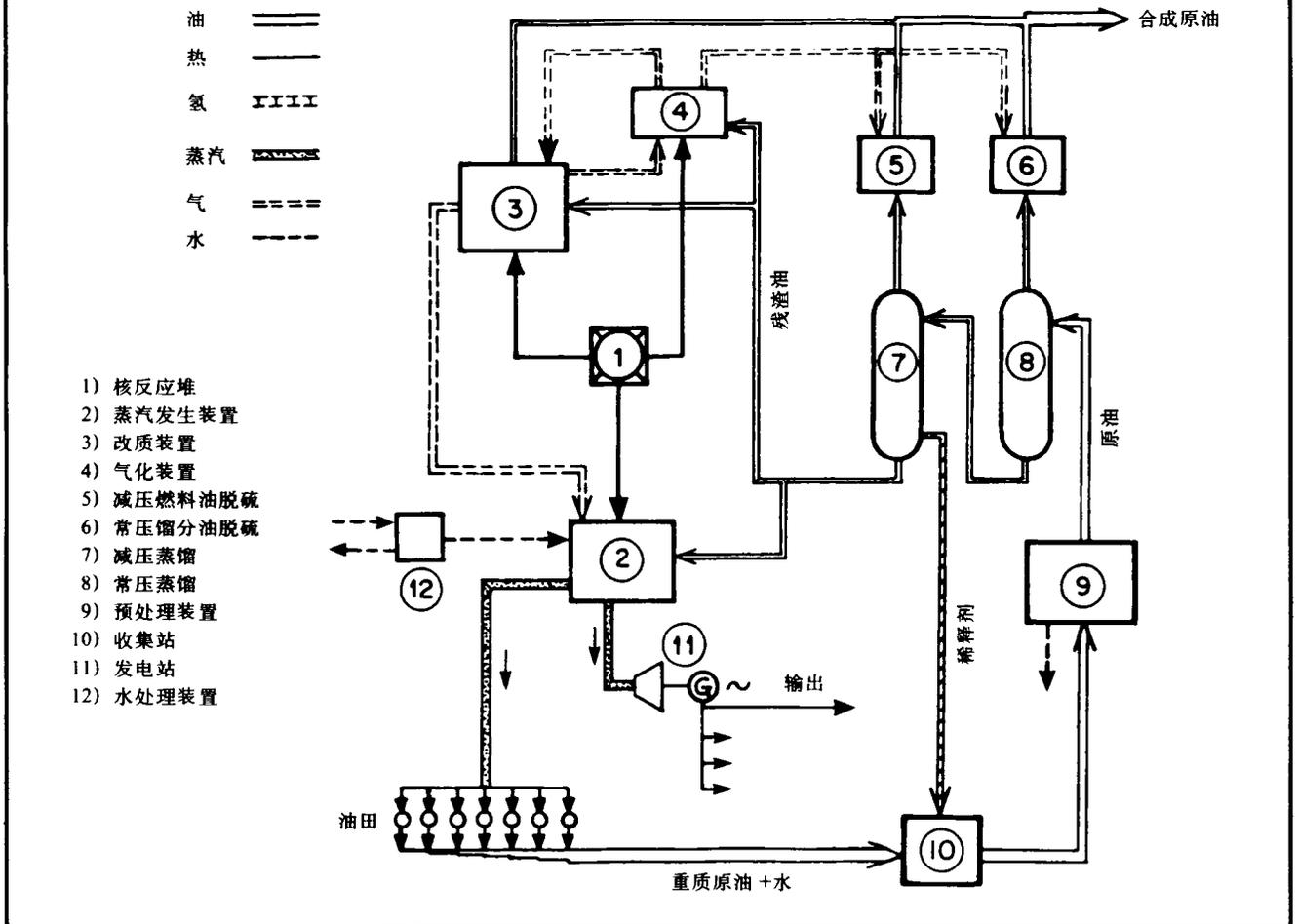
有一些公司，例如美国的通用原子公司、欧洲的瑞典通用电气公司-布朗·鲍维里公司和最近的德意志联邦共和国西门子公司，对用于 EOR（包括重油采收）的高温气冷堆（HTGR）的设计和应用，进行了广泛的研究。其它国家，例如苏联、中华人民共和国和日本，对生产工艺用热的 HTGR 反应堆，也进行了设计研究，前两个国家对采收重油特别感兴趣。

HTGR 型反应堆能够生产热力和蒸汽，其温度和压力甚至高于采收重油所需的值。因此，它们能够同时生产用于重油加工和发电的高质量蒸汽，并生产注入用蒸汽。这样一种热电并供的方式，可使核动力厂的运行方式变得更加灵活：当油田蒸汽需求量减少时，可把蒸汽转用于发电，这部分电力可用于满足石油加工厂的需求，过剩部分还可输出。

对于需要大量注入蒸汽的重油采收项目来说，直接从反应堆二回路取得蒸汽是行不通的，因为二回路的工作条件要求使用纯度和质量非常高的水，因此水处理的费用太高。不过，这个问题可用再生锅炉来解决。当然，这需要加一笔基建费，注入蒸汽的参数也会有些损失。

现在有一种把核动力同时用于重油采收和改质作业的大型方案，它相当于委内瑞拉超重质原油的 HDH 工艺。（见附图。）在这种方案中，HTG 反应堆除提供高压注入蒸汽外，还能满足温度在 500—700 °C 范围内的大多数工艺用热的需要。日本和其它一些国家正在开发更先进的 HTGR 堆，能提供较高的温度（900 °C 左右，甚至更高）。这种堆除了提供蒸汽和发电以外，还能用反应堆产生的工艺热驱动甲烷-蒸汽转化工厂制氢。最近的重点是开发输出功率较小的 HTGR 模块堆。这种堆能更加灵活地适应油田所需蒸汽的要求，必要时能让不同的模块用于不同

用核反应堆作为主要能源的奥里诺科油区超重质原油的采收和加工 (HDH 工艺)



的作业类型，并且在操作和安全方面具有更好的特性。

还考虑过用其它反应堆设计提供工艺用热的可能性。能产生 500℃ 热力的液态金属冷却堆，尤其是美国正在开发的小型模块堆，肯定会在未来的重油开发中获得应用。

目前，正在为商业应用开发的先进反应堆概念的设计目标，是使反应堆堆芯能够忍受最不利的环境，达到燃料熔化温度的风险也极小（因此一旦发生事故也不会明显地释放裂变产物）。

从经济角度进行的一些研究已表明，在进行此项研究的当时，与烧化石燃料（包括煤和残渣油）的方案相比，核动力有一定的经济优势。例如，美国通用原子公司曾于 1983 年做过一项研究，把 1170 MWth HTGR 用于利用蒸汽直接干馏工艺从页岩中

提炼石油的场合。结果表明，对于 2005 年开始运行的工厂来说，每桶改质页岩油的成本为 41 美元（1983 年美元，按 30 年归一）。对其它非页岩油项目进行的成本分析表明，开发成本也许比这个值低。

尽管如此，要同燃烧商业价值很低的改质后残渣油的情况相竞争，恐怕是困难的。然而，这些残渣油含有大量杂质，例如硫和氮，它们的燃烧肯定会对环境不利。按照严格的环境法规，这类残渣油的燃烧，不是遭到禁止，就是必须增设脱除这些杂质的昂贵设备。核方案中不存在这类排放物，从环境角度看它有有利的一面。

对石油市场的许多预测普遍表明，到下个世纪初，石油价格将上升到接近上述价格水平。因此，在并不遥远的将来，应用核动力的重油采收技术，确实有可能实现商业化。

核动力应用的前景

有关核动力用作重油开发热源的一些研究已经证实，在比较有利的石油市场条件下，核动力作热源的方案将比常规方法具有更好的经济效益和环境效益。

然而，由于核方案需要大量投资和具有较高的经济风险，因此，任何一个想继续从事核动力石油项目的国家，都需要根据现实的本国能源政策和已有改善的石油市场条件，作出有力的承诺。许多国家有大量外债，这就排除了它们应用核方案之类资本密集型方案的可能性，除非能作出特别安排。

下一代核动力机组的开发，为核动力用于石油

工业开辟了崭新的前景。现在，某些类型的核动力机组，技术上几乎已经过关，能够产生足够高的温度和压力，为重油开采和改质过程供热供汽。HTGR 由于已进入较高的开发阶段，并具有显著的安全特性，有希望成为这类应用中颇有前途的反应堆类型。

核动力的应用能够大量增加重要石油资源的产率，减小环境影响，提高安全标准。由于它能为不可替代的应用延长石油的充足供应期，因而能为许多国家的发展作出贡献。目前这种继续提高最现代化核反应堆设计的安全特性的发展趋势，无疑会对核辅助的各种工艺过程，其中包括重油采收过程的发展，产生积极的影响。

