

# 球床模块式高温气冷堆核电站 特点及推广前景研究

赵木<sup>1</sup>, 马波<sup>1</sup>, 董玉杰<sup>2</sup>

(1. 中核能源科技有限公司, 北京, 100084

2. 清华大学核能与新能源技术研究院, 北京, 100084)

**摘要:** 结合 20 万千瓦级球床模块式高温气冷堆核电站示范工程技术特点, 从安全性与经济性等角度深入研究高温气冷堆核电站的发展优势和前景。探索球床模块式高温气冷堆核电站潜在商机和未来融资方式。探索未来发展的产业布局和潜在用户。得出结论: 球床模块式高温气冷堆核电站采用氦气透平发电技术能充分利用其技术潜力, 未来群堆建设的经济性好, 在国内和发展中国家大量建设有广阔的市场和重大意义。

**关键词:** 球床模块式高温气冷堆核电站; 技术特点; 群堆建设; 固有安全性

中图分类号: TL31

文献标识码: A

文章编号: 1006-8759(2011)05-0001-04

## THE STRATEGIC STUDY OF PEBBLE MODEL HIGH TEMPERATURE GAS-COOLED REACTOR PLANT WITH POWER GENERATION FEATURE AND INDUSTRIAL APPLICATION PROSPECT

ZHAO Mu<sup>1</sup>, MA Bo<sup>1</sup>, DONG Yu-jie<sup>2</sup>

(1. *China Energy CO., Ltd, Beijing, 100084*; 2. *Institute of Nuclear and  
New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing, 100084, China*)

**Abstract:** On the basis of the technical feature of pebble model high temperature gas-cooled reactor (HTR-PM) plant, its developmental advantage and future are deeply investigated from inherent safety and economics. It is explored about the business opportunity and future financing mode of HTR-PM plant. Industrial distribution and potential user are studied. It is resulted that the technical potential can be developed fully using Gas turbine power generation technology. It has wide market and great significance to build more group modules at home and developing countries.

**Keywords:** pebble model high temperature gas-cooled reactor plant; technical feature; group modules construction; inherent safety

### 1 球床模块式高温气冷堆核电站特点及 优势分析

#### 1.1 球床模块式高温气冷堆核电站技术特点

我国的核电发展必须符合国际发展趋势, 必须发展更安全、更经济的新一代堆型。球床模块式高温气冷堆核电站具有固有安全性, 潜在的经济竞争力, 尽量采用成熟技术, 实现标准化、模块化设计和建造, 是新一代核能系统的优秀堆型, 符合

收稿日期: 2011-5-12

基金项目: 大型先进压水堆及高温气冷堆核电站重大专项  
(2008ZX06905-002)。

第一作者简介: 赵木(1981-), 男, 辽宁省大石桥市人, 工程师, 硕士, 高温气冷堆工程。

进一步改善经济性的要求。图 1 是华能山东石岛湾核电厂高温气冷堆核电站示范工程一回路三维模型图。如图所示,核岛采用通风式低耐压型安全壳堆芯,直流蒸汽发生器与反应堆“肩并肩”布置,三个壳体组成一回路压力边界。球床模块式高温气冷堆核电站采用两套核蒸汽供应系统带一台汽轮发电机组的技术方案,每座反应堆热功率为 250 MW<sub>t</sub>,总功率为 500 MW<sub>t</sub>,汽轮发电机组额定输出功率为 211 MWe。反应堆一回路采用氦气冷却方式,由设置在蒸汽发生器上部的主氦风机驱动,反应堆压力为 7 Mpa,氦气出口温度为 750 °C。主蒸汽系统采用母管制,“2-1-2”布置方式,从核岛出来后合并成一个母管,进入汽机房后由母管再分成两个支管进入汽轮机,主要技术参数见表 1。

球床模块式高温气冷堆核电站的主要技术特点为:系统简单,最大限度避免了堆芯进水事故,热力循环效率高。用石墨作为慢化剂和结构材料,

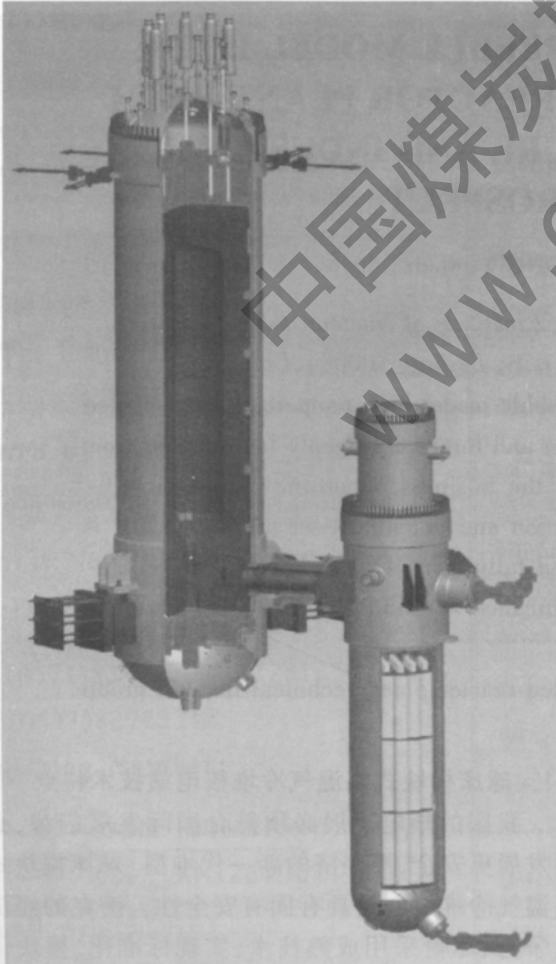


图1 球床模块式高温气冷堆一回路三维模型图

表 1 球床模块式高温气冷堆核电站主要技术参数

| 参 数        | 单 位               | 数 值  |
|------------|-------------------|------|
| 堆芯热功率      | MW                | 500  |
| 电站名义电功率    | MWe               | 211  |
| 堆芯直径       | M                 | 3    |
| 堆芯高度       | M                 | 11   |
| 一回路氦气压力    | Mpa               | 7    |
| 堆芯出口氦气温度   | °C                | 750  |
| 堆芯入口氦气温度   | °C                | 250  |
| 主蒸汽压力      | Mpa               | 13.5 |
| 主蒸汽温度      | °C                | 540  |
| 堆芯平均功率密度   | MW/m <sup>3</sup> | 3.22 |
| 电站效率(额定工况) | %                 | 42.2 |
| 电站可用率      | %                 | 90   |
| 电站设计寿期     | a                 | 40   |

堆芯周围没有金属部件。设置两套独立的停堆系统,控制棒系统和吸收球停堆系统。球形全陶瓷包覆颗粒燃料球形元件从堆芯顶部连续装入堆芯,同时从堆芯底部卸料管连续卸出燃料元件,采用连续装卸料循环的燃料管理模式,任何工况下燃料元件最高温度不超过其安全限值 1 620 °C<sup>[1]</sup>。

## 1.2 球床模块式高温气冷堆核电站优势分析

球床模块式高温气冷堆核电站是具有固有安全性的新一代堆型,完全符合核电未来发展方向,未来具有很好的经济性。球床模块式高温气冷堆的经济分析结果表明,与大容量压水堆核电厂相比较,其发电成本有很好的竞争力<sup>[2]</sup>。

### 1.2.1 球床模块式高温气冷堆核电站模块化理念

球床模块式高温气冷堆核电站实现全新的核安全概念:按照模块化概念和准则设计建造,增强了项目建设的标准化,减少了施工现场的工程量,大大缩短了项目的建设周期,降低了投资风险,降低后续工程的建设费用。后续球床模块式高温气冷堆核电站的建设中,设备定型和批量制造,设备造价降低。多模块反应堆带一机,组成较大功率规模的发电机组,通过共用辅助系统,降低造价。

### 1.2.2 球床模块式高温气冷堆核电站固有安全性

提高安全性、改善经济性是国际、国内核电发展中必须解决的问题。球床模块式高温气冷堆核电站满足阻止放射性释放的多重屏障纵深防御的基本安全原则,实现了固有安全性,其非能动安全特性使系统大为简单,不必设置压水堆核电厂中的堆芯应急冷却系统等专设安全设施,使得其依赖电力驱动的安全负荷的容量大为减少,并节省了建造投资。消除公众对核电安全性的疑虑,促进

核电进一步发展。

### 1.2.3 球床模块式高温气冷堆核电站满足小容量电网需求

球床模块式高温气冷堆核电站具有固有安全性,采用了较小的单堆容量,热功率约为 200~260 MW。其单堆容量较小,对电网的冲击较小,尤其适合呈离散式的小规模电网。由球床模块式高温气冷堆核电站支撑的小规模电网,可以大大降低输电成本,是非常理想的选择。

### 1.2.4 球床模块式高温气冷堆核电站发电效率高

球床模块式高温气冷堆核电站示范工程的发电效率为 42.2%。随着工业技术进步,采用氦气直接循环技术,利用高效换热和气体压缩装置,可将发电效率提高到 48%左右。如果将氦气温度提高到 900~1 000 ℃,采用直接循环氦气透平发电,热效率可以提高到 50%,从而大大提高经济性。

### 1.2.5 球床模块式高温气冷堆核电站不停堆燃料循环技术

高温气冷堆核电站采用不停堆装卸料技术,核燃料的高燃耗可降低核电站的折旧成本和燃料成本,大幅提高了核电站的经济性。卸出的燃料元件如果未达到预定的燃耗深度,则再送回堆内使用,使每个燃料元件的燃耗深度基本一致,未来最高燃耗可从 100 GWd/tU 提高到 150 GWd/tU。电站负荷因子可从首堆设计的 70%提高到 90%以上,又无需储备补偿燃耗所需的反应性,从而大大提高了反应堆的安全性。

### 1.2.6 球床模块式高温气冷堆核电站选址灵活

球床模块式高温气冷堆核电站由于安全性好,因而选址灵活,可以建立在工业区内或人口稠密的城市附近等负荷中心,就近经济地供电。另外,球床模块式高温气冷堆核电站采用非能动余热排除设计,不需大规模冷却用水,对可靠水源的依赖程度较低。设备的尺寸和重量都比压水堆的小很多,可以通过陆路运输的方式进行运输。

未来,可建立针对球床模块式高温气冷堆核电站的核安全法规,从而减少不必要的安全技术要求,则可进一步降低球床模块式高温气冷堆核电站的建造和运行成本。另外,球床模块式高温气冷堆用途广泛,满足国家未来的能源需求。高温气冷堆内氦气温度高,不仅可用来发电,也可用于大规模高效制氢,和为稠油热采、冶金、化工、煤的气化液化等提供大量高温工艺热。

## 2 球床模块式高温气冷堆核电站发电的潜在商机和未来融资方式

### 2.1 球床模块式高温气冷堆核电站发电的潜在商机

目前,我国人均用电量仅为世界平均水平的 1/2,由于工业化和城市化的驱动,未来能源需求预计将继续显著增长。2020 年能源需求极有可能达到甚至超过 31 亿 t 标准煤,届时核电将从国家电力的补充地位,发展到国家电力不可缺少的重要组成部分,在我国未来电力结构中扮演越来越重要的角色。

受环境污染和可开发资源等因素的限制,因此规模发展核电是实现我国能源可持续供应的不可替代的战略选择。加快发展核电,填补一次能源缺口,调整能源结构,减轻常规能源重负,核电将成为我国能源可持续发展的战略性接替能源<sup>[3]</sup>。在核电市场上,大型先进压水堆核电站将起主导作用,球床模块式高温气冷堆核电站可作为大型压水堆核电站的补充,同时可满足国家未来对核能制氢和高温工艺热的需求。球床模块式高温气冷堆核电站具有很好的固有安全性,选址灵活,不需大规模冷却用水,能源取代潜力高于其他堆型,其经济指标在将来充分发展成熟后可能与压水堆相近。高温气冷堆单堆容量较小,初始投资低,电站在经济方面较压水堆电站更有竞争力,尤其适合在中、小规模电网地区发展,适应国家西部大开发的需求。

### 2.2 球床模块式高温气冷堆核电站未来发展的融资方式

随着产业化的推进,球床模块式高温气冷堆核电站进入群堆建设阶段时,如果单一地采取注册项目公司,再进行企业融资的方式将难以适应高温气冷的大规模发展。借鉴国外核电建设和国内其他电站的筹融资方式,充分地发挥产业化平台的作用,采取企业融资和项目融资相结合的方式将是推进球床模块式高温气冷堆核电站大规模产业化的有效途径。将核电事业融入电力事业,面向市场竞争,允许电力公司投资建设核电,经营管理核电。在保持国有资本控股的前提下,允许民营资本及外资进入核电建设和经营事业。大力发展项目融资,以项目的预期收入和资产对外承担债务偿还责任。



在球床模块式高温气冷堆核电站发展的国际战略中,采用中外合资的方式,由中外双方共同投资和经营核电站,由中外业主共担经济风险,能大幅度降低电站造价。可使我国较快地形成球床模块式高温气冷堆核电站产业,进而加入到国际电站市场中去,用售电收入偿还投资的本息。同时中外双方应寻求适当的外币还贷方式,以及外方应提供优于常规核交易的贷款金融条件。在国际融资上还可以采用 BOT(build-operate-transfer,即建设-经营-转让)模式或其演变形式。投资者与政府签订特许权协议投资建设项目,建成后由其经营,在一定年限后将该项目无偿转让或移交给东道国政府拥有并经营。第三世界国家往往虽然主观上非常想发展球床模块式高温气冷堆核电站,可是资金不足,BOT模式是一种很好的解决这种主观意愿与现实困难的方法。可以通过业主公司或其它球床模块式高温气冷堆核电站建设主体与国内开发银行等金融机构合作,提供球床模块式高温气冷堆核电站的建设资金。通过开辟国外市场,促进球床模块式高温气冷堆技术的成熟,从而最大限度的降低经济成本。

### 3 球床模块式高温气冷堆核电站的产业布局 and 潜在用户

在对电力需求巨大的沿海地区,球床模块式高温气冷堆核电站由于受功率和规模容量的限制,不可能也不应当与压水堆核电形成竞争的关系,而应该形成对压水堆核电的有益补充,同时大力开拓海外市场。

#### 3.1 在国内的广大内陆地区发展球床模块式高温气冷堆核电站

球床模块式高温气冷堆核电站由于安全性好,选址灵活,可以建在内陆水资源相对匮乏的地区。我国广大内陆地区,干旱缺水,他们要求建造很小容量的核电站,并要求操作运行比较简单,即使发生误操作或故障也不会引起严重后果。同时,这也为我国内陆行将退役的火电厂改建提供了可能性。

#### 3.2 实现热-电联供多用途化

球床模块式高温气冷堆实现热-电联供。电站输出多种参数和高品位的蒸汽,且能靠近用

户(例如燕山石化总厂、胜利油田等),这是水堆难于与之竞争的,以核代高价油在经济上是能够承受的。

#### 3.3 海岛上建设球床模块式高温气冷堆核电站

在远离大陆的海岛(比如南海岛屿)建设球床模块式高温气冷堆核电站,改善海岛生存条件,实现维持人类居住及其本身的经济生活。由于固安全性、单堆容量较小等独特优点,所以可在南海我国控制的岛屿或建设的人工岛上建造球床模块式高温气冷堆核电站进行发电和海水淡化,彻底解决驻守军人和岛民的生活问题,弥补了南海岛屿后勤补给难以维持的问题。未来以这些岛屿为据点,与远洋能力相配合,全面控制我国管辖的海域,改变我国300万平方公里的海洋国土近一半存在争议的局面,使我国由海洋大国成为海洋强国。

#### 3.4 在全球核电市场中寻找高温堆的细分市场

广大发展中国家对电力等能源的需求呈快速增长的态势,为球床模块式高温气冷堆核电站的发展提供契机。同时,球床模块式高温气冷堆单堆规模小等特点也完全符合中小发展中国家的电网容量要求。贯彻“走出去”的方针,球床模块式高温气冷堆核电站国际战略可从这些中小国家开端,争取在在相关政府部门的支持下,取得国际市场的突破。

## 4 结论

球床模块式高温气冷堆核电站的能源取代潜力高,进行群堆建设,采用多模块反应堆带一台超临界蒸汽透平或氦气透平,组成较大功率规模的发电机组,可以进一步提高发电效率。球床模块式高温气冷堆可实现发电、制氢、稠油热采等功能,在国内外有广阔的市场和重大意义,必将成为未来先进核能系统的一个重要发展方向。

## 参考文献

- [1] 吴宗鑫,肖宏才.模块式高温气冷堆的安全特性.高技术通讯,1994,11:34-38.
- [2] 吴宗鑫,张作义.世界核电发展趋势与高温气冷堆.核科学与工程,2000,20(3):211-219.
- [3] 周苏军,王迎苏,池金铭.高温气冷堆发电技术的发展和和应用前景.中国电力,2001,34(12):8-10.