

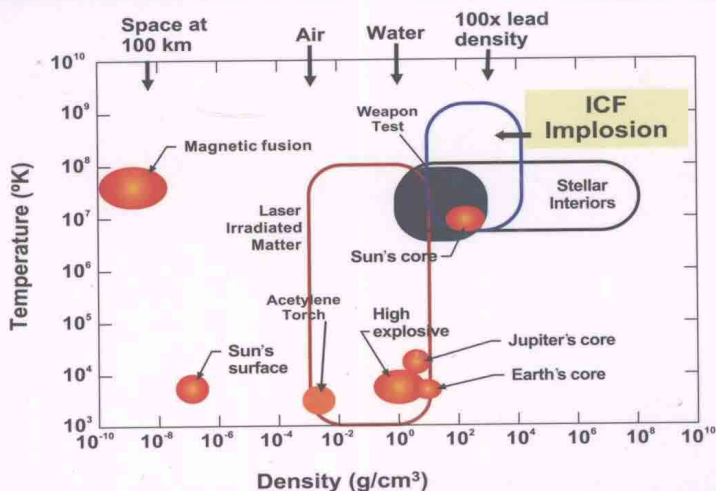
惯性约束核聚变现状

STATUS AND PERSPECTIVE OF NUCLEAR FUSION ENERGY

与能源前景

WITH INERTIAL CONFINEMENT

- 主编 B. IO. 萨尔柯夫
- 译者 华欣生 等
- 审校 周圭英 刘嘉锐



原子能出版社

惯性约束核聚变现状与能源前景

主编 Б.Ю.萨尔柯夫

翻译 华欣生 霍广盛 陶益之

原子能出版社

图字：01-2008-4010 号

图书在版编目 (CIP) 数据

惯性约束核聚变现状与能源前景/ (俄罗斯) 萨尔柯夫主编;
华欣生, 霍广盛, 陶益之译. —北京: 原子能出版社, 2008. 8
ISBN 978-7-5022-4241-1

I. 惯… II. ①萨…②华…③霍…④陶… III. 惯性约束聚变
装置—研究 IV. TL632

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 123602 号

内容简介

本书叙述了惯性核聚变靶制备理论与实验研究状况、高功率有效、安全的加热等离子体的驱动源, 并与之相配合的反应堆腔室, 燃料制成系统, 能源回路的热能提取等。

本书可供广大科技工作者、从事现代核能问题的物理学家以及研究生和高等院校相关专业的高年级大学生参考。

惯性约束核聚变现状与能源前景

出版发行 原子能出版社 (北京市海淀区阜成路 43 号 100037)

责任编辑 卫广刚 王 丹

特约编辑 郝 晋 李天惠

印 刷 四川绵阳科学城印刷厂

经 销 全国新华书店

开 本 850 mm×1168 mm 1/32

印 张 9.375

字 数 232 千字

版 次 2008 年 6 月第 1 版 2008 年 6 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-4241-1

印 数 1—600 定 价 40.00 元

版权所有 侵权必究

网址: <http://www.aep.com.cn>

惯性约束核聚变现状与能源前景

主编 Б.Ю.萨尔柯夫

М.М.Баско	巴斯柯
С.Ю.Гуськов	古西科夫
А.Н.Диденко	奇登柯
А.В.Забродин	扎巴罗金
В.С.Имшенник	依姆申尼克
Д.Г.Кошкарёв	柯施卡来夫
М.В.Масленников	马斯列尼柯夫
С.А.Медин	梅金
С.Л.Недосеев	涅达谢也夫
Ю.Н.Орлов	奥尔洛夫
В.П.Смирнов	斯米尔诺夫
В.И.Субботин	苏伯廷
Л.П.Феоктистов	费奥克捷斯托夫
В.В.Харитонов	哈里通诺夫
М.Д.Чуразов	邱拉佐夫
Б.Ю.Шарков	萨尔柯夫

惯性约束核聚变现状与能源前景*

М:数理出版社, 2005, 264 页, 15BN5-9221-0619-8

编辑 Б.Ю.萨尔柯夫

编委会 В.И.苏伯廷院士(组长) Б.Ю.萨尔柯夫 Ю.Н.奥尔洛夫

Л.П.里托夫金娜

译者 华欣生 霍广盛 陶益之

审校 周圭英 刘嘉锐

* 俄基础研究基金会支持出版 04-02-30003J1

中文版前言

随着人类发展步入 21 世纪，产生了两个至关重要的问题。这两个问题的解决可确定人类未来的发展轨迹，因而对人类来说是至关重要的。看看我们周围吧，在文献资料中，在新闻媒体上，这两个问题被反反复复不断地讨论。究竟是什么问题能如此引人注目？是持续增长的能源需求问题，是人类因能源活动向自然环境排放大量温室气体和粉尘的问题。这其中使用碳氢燃料是导致废气产生的主要原因。另一方面，由于燃料储量有限，尤其是石油和天然气储量有限，也使我们不可能乐观地去看待人类未来。而使用煤炭则会导致大量排放有害物质，同时人类也没有成熟的技术，去避免这些危害。基于种种情况，引入一种在生态上安全可行的、可产生大量能源的方法是当务之急。为了满足这种需求，两种基本的技术，即核能源和热核能源，必须得到实质性的发展。

过去几十年的发展，人类在核能源方面已经储备了大量的有关知识和关键经验。但是，快中子反应堆未来的发展将会面临铀燃料耗尽的问题，并且处理放射性废料排放问题也相当昂贵。而直到现在，热核能源仍不能用于工业发电厂，建造它们还有很长的路要走。尽管如此，今天的工程师和物理学家却对成功充满信心。为此，人们建造了国际热核实验堆（ITER），它安装了基于磁等离子体约束原理的托克马克装置。

磁约束聚变，人类热核研究中发展最为完善的领域，有可能满足热核反应堆在物理和工程上要求。如今，我们已经很清楚，热核反应堆毫无疑问具有很多优点：环保，安全，原料充足，无

大量长期放射性废料。基于磁等离子体约束原理的热核电厂需要相当复杂的技术，其中包括加热等离子体，抑制不稳定性，解决反应堆内墙材料的热承受问题。这使得热核反应堆具有相当庞大的几何尺寸。因为它所产生的总电能超过 1 GW (10^9 W)，磁约束聚变电站最为适合的应用领域是为大众消费者提供电能。

通过发展和引爆热核武器，人们掌握了惯性约束聚变工作原理。但为了能开发出实用的发电方案，则必须在反应堆容器中重复而持续地实现微型热核爆炸，由此产生的能流既可用于发电，也可储存于其他的能量载体中，如氢气。与磁约束聚变相比，惯性约束聚变的特殊性并不妨碍聚变电站电能的扩容。人们可能会找到解决反应堆内壁问题的方法。经过长时间的理论和实验研究，上述的可能性会被逐一验证。其中主要的问题是驱动源的选择（激光、粒子束、Z 箍缩），制靶，反应堆容器的设计方案。尽管历史上热核武器拥有国在惯性约束聚变上投入大量财力，但发展惯性约束聚变电站的问题却一直没有得到足够重视。我们可以推测，如果人们在实验室中成功地验证了高增益聚变靶丸的点火过程，这将会促进惯性约束发电的深入研究。若谈及热核电站设计工作的组织形式，ITER 的研制将是欧洲、日本、俄罗斯和美国共同参与的结果。现在，中国、韩国和印度也加入了 ITER 研制计划。其他一些国家也正在研究成为 ITER 建造国的可能性。今后，在惯性约束聚变领域，许多重要的研究计划将由美国、法国、俄罗斯、中国、德国和其他一些国家共同来完成，从中发展而来的知识将成为设计联合惯性聚变实验堆的基础。

基于上述原因，我们以书本的形式定期总结了在世界范围内惯性聚变能源的研究成果，很明显，这是十分重要的。这本书的

面世是这方面工作的第一步，它无疑将有助于刚起步的研究人员开始涉足惯性聚变能源问题。而已经从事该领域的物理学家和工程技术人员也会对此感兴趣。

虽然本书篇幅不长，但对于基本的惯性聚变能源问题，包括它的经济性，书中均展开了详细的阐述。

显然，几十年以后，经过对惯性约束聚变问题的深入研究，对于那时的读者而言，一些书中所涉及的问题变得相当浅显了。但我们希望，他们能认识到本书有助于引发研究者对惯性聚变能源的兴趣，并引导他们在未来取得成就，这正是我们这些惯性聚变能源领域的专家们所热切期望的。

В.П.斯米尔诺夫 院士

Б.Ю.萨尔柯夫 教授

2007年4月

Foreword to Chinese edition of the book

Two extremely important problems arise before mankind with beginning of the 21st century. Its solution should determine trajectories of further development, and may be survival. These well-known problems are constantly discussed both in the special literature and in mass media. There are growing needs in power supply and action on ecology by emissions of greenhouse gases and dust. Use of hydrocarbon fuel is a principal cause of production of waste gases. On the other hand, the restricted reserves of burning fuel and, first of all, oil and gas do not allow to be optimism in the near future. Use of coal is interfaced with especially greater harmful emissions and there are no developed technologies to avoid them. In the circumstances introduction of ecologically comprehensible and safe expedients of mass production of the energy, grounded on practically inexhaustible fuel reserves is a high priority. Therefore, two basic directions- nuclear and thermonuclear energy, satisfying these requirements, have to meet the essential development.

The nuclear power has stored the extensive knowledge and essential experience of the past decades development. However, further development of fast neutron reactors are needed to meet the exhaustion of uranium fuel. The needs to solve the issues with mass production of waste fission fuel also shall be very costly. The thermonuclear energy community has not demonstrated till now the industrial electric power plants. And though the trajectory up to their

construction is still long, today among engineers and physicists confidence of success is high. Acknowledgement to it is the solution on a construction of the international thermonuclear experimental reactor ITER based on a principle of magnetic plasma confinement realized in the Tokamak installation.

Magnetic confinement-the most developed field in thermonuclear researches has chance to satisfy physical and engineering demands on energy thermonuclear reactor. Today it is already clear, that such reactors will possess a series of doubtless advantages: an ecological acceptability, intrinsic safety, the unlimited fuel resource, lack of a significant amount of long-lived radioactive waste. The thermonuclear power plant based on a principle of magnetic confinement demands the complex technology of the plasma heating, inhibitions of instabilities, solutions of a problem of the material resistance to energy load on the first wall of a reactor. All these lead to the significant sizes of a reactor and the full electrical power not less 1 GW. Therefore the most comprehensible field for fusion power plant with magnetic confinement is the power supply for mass consumers.

Inertial confinement by virtue of historical development has gained pioneer acknowledgement of the basic operation principle through explosions of thermonuclear bombs. However to develop the practical scheme of power plant it is necessary to define requirements of implementation of the small explosions consistently repeating in the reactor chamber where arising streams of energy can be used for

production of electricity or other carriers of energy, for example, hydrogen. Expected specificity of inertial confinement does not exclude the expansion of power range of fusion plant in comparison with magnetic confinement. It would be quite possible to find the relaxed solution of the first wall problem of a reactor. Acknowledgement of these possibilities can be cleared up after enough long time theoretical and experimental researches. The major problems which are the subjects for solution are selection of the driver (lasers, bundles of particles, Z-pinch), constructions of a target and the reactor chamber scheme. Though inertial confinement historically got more significant financial support in the countries-owners of the thermonuclear weapon, questions of power plant development yet have not gained sufficient attention. It is possible to guess, that successful demonstration of fusion capsule ignition with high gain in laboratory has to push for intensive study of power production based on inertial confinement. As the sample of the future organization of operations on development of thermonuclear power plant design it is possible to take the ITER experience whose design has been created as a result of integrating resources of Europe, Japan, Russia (Soviet Union) and the USA. Nowadays China, South Korea and India have joined the ITER project. A series of other countries are studying an opportunity to become also participants of the ITER construction. The knowledge developed during the implementations of significant research programs in the field of inertial confinement which have been carried out by USA, France,

Japan, Russia, China, Germany and other countries could become in the future a bottom for the design of the Joint Inertial Fusion Experimental Reactor.

For this reason it is obviously important to summarize periodically results of the inertial fusion energy (IFE) study in the world, in one book. Occurrence of the present book is a step in this direction, that, unconditionally, will help to enter into problems of IFE for beginning researchers. The book also will be interesting to physicists and the engineers already working in this field.

Despite of rather small volume of the book, in it the basic problems of IFE, including its economy are discussed in main details.

Undoubtedly, after further decades of intensive study of an inertial confinement, some questions mentioned in this book, can seem naive to the readers of that time. Hopefully they will acknowledge this book helped to support the interest to IFE among researchers and led to future achievements which we, experts of this field, expecting with optimism.

V.P.Smirnov, Academician

B.Yu.Sharkov, Professor

April, 2007

原 序

本书由俄罗斯和国际著名科学家集体撰写，他们的专业涉及等离子体物理、核能、热物理、计算数学、热核聚变、辐射材料科学以及原子能动力工程经济学等不同领域。

在 А.И.阿里汉诺夫理论与实验物理所，由 В.И.苏伯廷院士领导的俄罗斯科学院科学委员会酝酿并撰写了有关能源问题的报告。该委员会工作始于 1999 年，委员会成员包括从事等离子体物理、核能学、热物理、计算数学、热核聚变、辐射材料科学等领域的著名专家，他们讨论、交流信息，迅速形成创新的学术气氛，产生出了诸多惯性约束聚变（ICF）新的科学思想和技术途径。委员会的研究成果在科技杂志、全俄和国际学术会议上发表。一些原创性研究成果编入了莫斯科工程物理学院(МИФИ)以及莫斯科技术物理学院(МФТИ)相关专业的教科书。

基于最新的学术成果和科学成就，给出了关于惯性约束核聚变的物理、技术、经济和环境方面的分析。详细研究了 ICF 制靶工艺，同时研究了以能源为目标的与反应堆室、燃料制作系统和热交换相适应的强力、有效、安全的等离子体加热源(驱动器)。书中指出，未来 ICF 堆的诱人之处以及经济上的竞争能力涉及到碳氢燃料和裂变材料的开采价格的增长，涉及废物储存和利用的价格快速增长以及很高的反应堆运行物理安全水平。

阐明了 ICF 科研和技术发展的关键方向，应当吸引和集中科学家和工程技术人员的力量，努力实现 ICF 作为未来核能的一部分。

第一章给出了 ICF 原理方案的概念。

第二章研究了 ICF 驱动器的基本形式。

第三章提供了 ICF 不同靶型提高热核聚变增益系数的理论与计算结果综述。

最值得读者关注的是第四章，给出了 ICF 反应堆腔室和电站的概念，分析了 ICF 电站的主要方案，提出了按能源判据评估 ICF 能源装置的示意图，特别是快点火热核靶重离子驱动器电站的概念(ИТИС)。此外，讨论了强流脉冲放电能源装置的最新构思。

第五章给出某些 ICF 电站方案经济指标的评价，对热核反应堆经济指标进行了数值计算，并对 ICF 电站建设和运行的不同预测方案进行了分析、比较。

第六章作为结束语，从构成未来集成核能源方面讨论了 ICF 的特点、问题和发展前景。

附录给出了更为详细的方案以及对个别观点的说明，同时讨论了将氢能源和核能源纳入统一的能源综合体的现实课题。

我们期望本书给读者以最完整的关于 ICF 现状的信息，以及它作为未来能源的前景。

作者对 Л.П.里托夫金娜为本书准备手稿时所付出的巨大劳动表示深切和真诚的感谢，同时感谢 В.И 杜尔齐柯夫所给予的技术帮助。

物理数学博士、教授 Б.Ю.萨尔柯夫

目 录

中文版前言.....	B.П.斯米尔诺夫, Б.Ю.萨尔柯夫	
Foreword to Chinese edition of the book.....	V.P.Smirnov, B.Yu.Sharkov	
原序.....	Б.Ю.萨尔柯夫	
引言.....	Ю.Н.奥尔洛夫, Б.Ю.萨尔柯夫	1
参考文献.....		9
第一章 惯性约束聚变原理方案.....		10
.....	Б.П.斯米尔诺夫, В.И.苏伯廷, Б.Ю.萨尔柯夫	
参考文献.....		13
第二章 惯性约束聚变驱动器.....		14
.....	С.Ю.古西科夫, С.Л.涅达谢也夫, Б.П.斯米尔诺夫, Б.Ю.萨尔柯夫	
2.1 激光驱动器.....		14
2.1.1 对激光驱动器的一般要求.....		14
2.1.2 钕玻璃固体激光器.....		17
2.1.3 气体激光器.....		19
2.1.4 结论.....		21
2.2 强流脉冲放电系统.....		22
2.3 重离子加速器.....		24
参考文献.....		27
第三章 惯性约束聚变靶.....		29
.....	М.М.巴斯柯, С.Ю.古西科夫, С.Л.涅达谢也夫, М.Л.邱拉佐夫	
3.1 ICF 靶的热核增益.....		30
3.2 ICF 靶.....		36
3.2.1 直接(驱动)辐射靶.....		36
3.2.2 激光间接辐射 X 射线靶.....		40
3.2.3 直接辐射 X 射线靶.....		42
3.2.4 直接点火—快点火.....		44

3.3 重离子聚焦靶.....	49
3.3.1 间接驱动靶, DT 小囊结构.....	51
3.3.2 自由黑腔 X 射线靶.....	52
3.3.3 紧凑黑腔和分布式转化器的 X 射线靶.....	54
3.3.4 快点火直接辐射柱形靶.....	57
3.4 Z 箍缩驱动器系统靶.....	61
3.4.1 Z 箍缩辐射黑腔.....	61
3.4.2 DT 燃料稠密柱的热核燃烧.....	62
3.5 ICF 靶能源效率的比较分析.....	65
参考文献.....	68
第四章 惯性热核聚变反应堆室和电站概念.....A.B.扎布洛金, B.C.依木什尼克, Д.Г.科什卡列夫, M.B.马斯列尼科夫, C.A.曼吉, C.Л.聂达谢也夫, Ю.Н.奥尔洛夫, М.Д.邱拉佐夫, Б.Ю.萨尔柯夫	71
4.1 惯性热核聚变反应堆.....	71
4.1.1 惯性热核聚变反应堆分类.....	71
4.1.2 溶液再生区反应堆 (HYLIFE- II)	73
4.1.3 浸湿初始墙反应堆.....	75
4.1.4 干式初始墙反应堆.....	79
4.1.5 反应堆室对能流作用的影响.....	81
4.2 惯性热核聚变电站基本方案.....	86
4.2.1 惯性热核聚变电站分类.....	86
4.2.2 热核电站主要能源指标.....	87
4.2.3 混合型热核电站方案.....	89
4.2.4 “纯”热核电站方案.....	90
4.2.5 激光驱动器方案.....	90
4.2.6 重离子驱动器方案.....	91
4.2.7 轻离子和电子驱动器方案.....	91
4.2.8 惯性热核聚变能源装置方案能源判据评估.....	92
4.3 惯性热核聚变电站热能系统.....	93
4.3.1 热能方案结构.....	93

4.3.2 热循环上限温度限制因素.....	95
4.3.3 惯性热核聚变发电机组单机功率的选择.....	97
4.4 重离子驱动器和快点火热核靶电站概念(重离子惯性聚变反应堆方案)	98
4.4.1 重离子驱动器惯性热核聚变反应堆特点.....	98
4.4.2 高功率重离子驱动器.....	100
4.4.3 圆柱形靶.....	104
4.4.4 反应堆室工艺设计.....	107
4.4.5 反应堆室初始墙对微爆炸的影响.....	109
4.4.6 反应堆再生区能量输出.....	113
4.4.7 热核电站热能方案计算.....	115
4.4.8 4.4 节结论评语.....	118
4.5 Z箍缩惯性热核聚变反应堆.....	120
4.5.1 低频Z箍缩热核反应堆(ИТРЗ(Н))原理结构方案.....	120
4.5.2 低重复频率微爆炸脉冲热核反应堆[ИТРЗ(Н)]概念分析——低频Z箍缩惯性热核反应堆.....	122
4.5.3 ИТРЗ(Н)结构材料工作条件.....	124
4.5.4 ИТРЗ(Н)初始墙和再生区材料的脉冲热过程和质量研究.....	125
4.5.5 辐射对反应堆室初始墙的影响.....	127
4.5.6 ИТРЗ(Н)混合堆主要参数.....	129
4.5.7 结论.....	130
参考文献.....	130
第五章 惯性热核聚变电站的经济评估.....B.B.哈里托诺夫	135
5.1 引言.....	135
5.2 惯性热核聚变电站关键参数.....	136
5.3 电能价格分析估算.....	138
5.4 热核电站财务数值模拟.....	144
5.5 不同设计方案的比较分析.....	150
5.6 不同数量反应堆设计方案比较.....	152
5.7 结论.....	155
参考文献.....	156

第六章 惯性约束聚变优越性、问题和发展前景.....Ю.Н.奥尔洛夫, В.П.斯米尔诺夫, В.И.苏伯廷, Л.П.费奥克捷斯托夫, Б.Ю.萨尔柯夫	157
参考文献.....	163
附件 A Z 箍缩驱动器和等离子体传输线惯性约束聚变反应堆方案С.Л.涅达谢也夫	165
A.1 磁自绝缘线原理.....	165
A.2 磁绝缘真空传输线实际聚能器电流拓扑布局 and 结构.....	166
A.3 磁自绝缘等离子体传输线.....	168
A.4 等离子体传输线 Z 箍缩驱动器反应堆方案	172
参考文献.....	172
附件 B Z 箍缩中子源脉冲等离子体核反应堆(ИПЯР)方案分析.....С.Л.涅达谢也夫	173
B.1 引言.....	173
B.2 脉冲等离子体核反应堆(ИПЯР)方案.....	174
B.3 快 Z 箍缩等离子体中子源.....	181
B.3.1 引言.....	181
B.3.2 轴向非均匀氦 Z 箍缩中子源原理.....	182
B.3.3 实验结果.....	183
B.3.4 脉冲等离子体核反应堆全尺度 DT-中子源参数外推结果....	184
B.3.5 优化 Z 箍缩靶的参数评估.....	185
B.3.6 振荡离子箍缩(ПОИ)原理示意图.....	186
B.3.7 振荡周期评估.....	187
B.3.8 振荡离子箍缩靶温度说明.....	188
B.3.9 定标外推的结论.....	189
参考文献.....	190
附件 C 可复原传输线 Z 箍缩反应堆概念.....С.Л.涅达谢也夫	191
参考文献.....	193
附件 D 利用高功率重离子驱动器建造惯性约束核裂变能源.....Д.Г.科什卡列夫	194
参考文献.....	197