

# 兰州重离子加速器装置建设的历史考察

李秀波, 王大洲

(中国科学院大学 人文学院, 北京 100049)

**摘要:** 兰州重离子加速器装置是我国规模最大、加速离子种类最多、能量最高的重离子研究实验装置, 其建设跨越了 50 余年的历程。基于一手档案资料, 参考有关传记、访谈及报道, 逐一描述了 1.5 米回旋加速器、重离子加速器和冷却储存环的立项建设过程, 分析了兰州重离子加速器装置对相关领域科技发展的强大支撑作用。最后, 从大科学工程的定位、布局 and 跨国知识流动等方面总结了其历史经验。

**关键词:** 近代物理研究所; 1.5 米回旋加速器; 重离子加速器; 冷却储存环; 工程史

**中图分类号:** TL56; G31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-4969(2019)03-0297-12

兰州重离子加速器装置(下文简称 HIRFL)的建设历经 1.5 米回旋加速器的建设、重离子加速器的建设和冷却储存环的建设等, 从 1957 年延续至 2008 年, 前后跨越了 50 余年。经过多次建设和改进, HIRFL 已成为我国能量最高、规模最大的重离子研究实验装置。它由电子回旋共振离子源(ECR)、1.7 米扇聚焦回旋加速器(SFC)、分离扇回旋加速器(SSC)、冷却储存环(CSR)、放射性束流线、实验终端等设施组成。1964 年, 1.5 米回旋加速器建成。1988 年, 由 1.5 米回旋加速器改造而来的扇聚焦回旋加速器作为注入器, 分离扇回旋加速器作为主回旋加速器的重离子加速器完成建设。2008 年, 以重离子加速器作为注入器, 又建成了冷却储存环的主环和实验环。

关于 HIRFL 的建设已存在一些历史文献和资料。《中国原子能科学研究院简史》(1950~2010 年)一书描述了 20 世纪 50 年代我国核物理实验设施的起步情况<sup>[1]</sup>, 其中包含与兰州重离子加速器建造有关的一些早期装置的研制情况, 如质子静电加速器、高压倍加器和 1.5 米回旋加速器。邬恩九对 1956 年至 1987 年近代物理研究所的发展历程做了历史回顾, 其中对杨澄中在 1.5 米回旋加速器和重离子加速器建设中的领导作用有详实记述<sup>[2]</sup>。还有一些文史资料也记载了杨澄中在我国质子静电加速器和高电压倍加器研制、1.5 米回旋加速器和分离扇回旋加速器建设中的突出贡献<sup>[3-6]</sup>。此外, 作为亲历者, 魏宝文讲述了他参与兰州重离子加速器设计与建设中的一

杨澄中(1913-1987), 江苏常州人, 核物理学家, 中国原子核科学事业的开拓者之一。1937 年毕业于中央大学(1949 年更名为南京大学)物理系, 1950 年获英国利物浦大学哲学博士学位。他领导创建了中国科学院兰州近代物理研究所, 开创了中国重离子反应实验研究, 为中国原子核物理事业培养了大批人才。

魏宝文(1935-), 河南禹州人, 核物理学家, 中国科学院院士。1957 年毕业于北京大学物理系, 历任中国科学院近代物理研究所所长、兰州分院院长等职, 现任兰州重离子加速器国家实验室主任。

收稿日期: 2018-05-13; 修回日期: 2019-06-10

基金项目: 中国科学院自然科学史研究所重大突破项目: 中华人民共和国科学技术史纲(Y621081)

作者简介: 李秀波(1985-), 男, 博士研究生, 研究方向为工程史与工程哲学。E-mail: lixiubo10@mailsucas.edu.cn

王大洲(1967-), 男, 博士, 教授, 研究方向为工程史与工程哲学。E-mail: dzwang@ucas.edu.cn

些故事<sup>[7,8]</sup>; 夏佳文 则讲述了主持冷却储存环设计工作的一些情况<sup>[9]</sup>; 詹文龙 在兰州重离子加速器放射性束流线建设中的贡献也多有报道<sup>[10-12]</sup>。

以上资料具有可贵的史料价值, 但未能完整呈现 HIRFL 工程建设的整体面貌。本文将基于史学研究方法, 依据工程建设档案、回忆文章和访谈资料等, 对跨越数十年的兰州重离子加速器建设进行工程史考察, 尽可能还原工程建设的总体面貌, 总结其中的经验教训, 以期对当前我国的大科学工程建设有所启示。

## 1 1.5 米回旋加速器的建设

20 世纪 50 年代初, 因朝鲜战争受到美国核威胁, 新中国领导人意识到了拥有原子弹的战略意义, 下决心发展原子能事业, 特别是开展原子弹的研制工作。经过多次商议, 苏联同意在原子能领域向中国提供援助。根据当时的战略布局, 周恩来总理于 1956 年做出了“除北京附近以外还应该在兰州设一个原子核科学的点”的指示<sup>[13]</sup>。1957 年 4 月~5 月, 从中国科学院物理研究所抽调的 36 名科技人员, 在物理学家杨澄中的带领下先后来到兰州, 与甘肃省委调配的 20 余名行政后勤人员一起, 于 6 月成立了“中国科学院兰州物理研究室”<sup>[2]39-45</sup>。该研究室以原子核物理研究为重点, 同时开展核技术应用研究和培养核科技人才和队伍。

高压倍加器是当时开展核物理实验的基础设备。1956 年底, 杨澄中等设计和建造了我国第一台 400keV 高压倍加器。1957 年该倍加器被拆卸并搬到兰州。1958 年 2 月, 经过组装和改造后, 该倍加器投入使用。1959 年 5 月, 在一次专门召开的现场会上, 高压倍加器的设计、制造、安装、调整等方面的经验被推向全国。1961 年 10 月, 国家科委专门在上海召开高压电器设计会议, 讨

论其定型设计和生产问题。1962 年, 兰州物理研究室与上海先锋电机厂合作设计、建造了 600keV 的双主体高压倍加器, 1965 年建成并投入使用。后来, 为了满足原子弹研制任务对不同能区的需要, 还设计建造了 15~50keV 和 40~150keV 的高压倍加器。在这方面, 近代物理研究室用“小装置做出了高水平”成果, 用“小设备培养出硬队伍”, 为国内建造高电压型加速器的研制和应用研究做出了贡献<sup>[2]64-72</sup>。

对于原子能事业的发展而言, 大型加速器更是必须的。为此, 经过争取, 苏联同意将 1.5 米回旋加速器作为 156 个援助中国项目之一。该加速器项目由第三机械工业部和中科院负责在兰州建设, 其中三机部负责工程投资, 中科院负责工程建设的领导和管理。根据协议, 苏方提供全套图纸、技术资料 and 主要设备, 并派遣专家现场指导安装调试工作。1957 年 9 月, “1.5 米回旋加速器建设工程(简称 613 工程)”设计会议在兰州举行, 有关专家就选址、供热、供电、供水等问题展开磋商。1958 年 6 月, 二机部(原三机部)在兰州成立了 613 工程处, 专门负责加速器建设。随后, 1.5 米回旋加速器开工建设。1960 年 8 月, 工程进入以调试为主、安装为辅、土建配合的阶段。此时, 苏联专家中除剂量防护专家外有 9 人相继来到现场。苏联专家的知识援助有助于中国核工业的起步。

然而, 由于中苏关系彻底破裂, 苏联专家当月突然全部撤走, 并带走了所有图纸和调试资料, 停止了未到货的约 70 多项、共计 300 多台件器材设备和零部件的供应, 包括三台机械真空泵和调磁变阻器等重要设备<sup>[2]87-88</sup>。此时, 设备安装刚完成 60%、单项调试完成 20%, 总体调试尚未开始。剩下的工程任务只能由 613 工程处独立完成。由于当时工程处跟随苏联专家的人员多是刚毕业或

夏佳文(1964-), 重庆涪陵人, 中国工程院院士, 现任兰州重离子加速器国家实验室副主任。

詹文龙(1955-), 福建厦门市人, 中国科学院院士。1982 年毕业于兰州大学现代物理系。历任中国科学院近代物理研究所副所长、所长, 现为中国科学院副院长。

实习不久的大学生,在与苏联专家共同工作时,养成了相信专家、依靠专家的思维,没有掌握工作的主动权。这就导致其专业技术水平和实际工程所需相差甚远,而设备断供和图纸缺乏更让其无从下手。时任二机部副部长的刘伟来到现场,鼓励大家要自力更生,拿下这台加速器。之后,613工程处详细分析了问题与困难,开始逐一攻关。苏联停止供货的设备,或设法代用,或修改原设计,或自行设计制造。例如,工程技术人员利用现有的小型机械泵与国产机械泵结合使用的方式,代替了原定的三台机械真空泵;在国内各单位的配合下,完成了水流继电器、隔离变压器、高压电缆的加工和试制。

1962年1月,为了推进613工程的顺利实施,中国科学院和二机部决定将兰州物理研究室与613工程处合并,成立近代物理研究所,隶属二机部。1962年底,近代物理所完成了全部设备的配套、安装和调试工作。1963年初开始联合调试,半年后完成了内靶调束,10月完成了外靶调束,束流强度超过原设计目标。1964年5月,1.5米回旋加速器正式投入运行。随后,近代物理所的核物理研究工作逐步从400keV高压倍加器的低能区转移到1.5米回旋加速器的较高能区。

在1.5米回旋加速器建设的几年间,形成了一支包括理论核物理、实验核物理、核探测器、核电子学及核化学等专业,以快中子物理和低能轻核反应为方向,具有一定核物理研究设备建造经验的科研队伍。靠着这支队伍,开展了以国防科研任务为中心的核物理研究工作。1965年4月,二机部向近代物理研究所下达了有关研究热核材料的1号和2号国防科研任务:1号任务是关于15~150keV氘-氘反应总截面的绝对测量和13.8~114.3keV氘轰击氘反应总截面的绝对测量;

2号任务是关于快中子—— ${}^6\text{Li}$ 、 ${}^7\text{Li}$ 的非弹性碰撞截面及次级能谱测量。在杨澄中的领导下,近代物理所组织了5个实验小组,分别在1.5米回旋加速器、600keV和400keV高压倍加器以及专为这一任务而建造的150keV高压加速装置和50keV离子源上进行实验工作<sup>[14]</sup>。虽然杨澄中在文革中受到迫害,但他一边挨整一边工作,带领科研骨干和工程技术人员,历时5年完成了任务。从数据结果和测试技术来看,这两项任务取得的成果分别达到了当时的国际水平和国内先进水平,为我国氢弹研制设计提供了热核材料的第一手可靠数据,该研究于1978年获得全国科学大会奖<sup>[2]93-100</sup>。

在承担国防科研任务期间,原子核物理基础研究方面的部分人员相对较空闲。时值文革,他们就代替承担任务的人员参加政治学习和集体活动,同时自己寻找课题。1970年,他们在戴光曦和顾金南的带领下查阅文献后发现:国际上类似1.5米回旋加速器的装置大都是加速“氦”以上的离子,开展中、重离子反应研究。在国防科研任务接近尾声之时,他们提出了开展了超铀、超重元素(简称“双超”)的合成研究的想法,得到上级的认可。近代物理所逐渐形成了将研究定位转移到重离子物理研究领域的共识。为配合“双超”工作的开展,1970年10月,该所将1.5米回旋加速器改建为一台能加速到氦的重离子加速器。之后,该加速器成功加速了 ${}^{12}\text{C}$ 、 ${}^{14}\text{N}$ 、 ${}^{16}\text{O}$ 等较轻的重离子,并利用 ${}^{12}\text{C}$ 轰击 ${}^{238}\text{U}$ 靶合成了元素镅,开启了重离子物理研究。

## 2 重离子加速器的建造

由1.5米回旋加速器改造成的重离子加速器只能加速C、N、O等较轻的重离子,且能量分辨

刘伟(1916-1998),江西兴国县人。1958年2月任第二机械工业部副部长,“文化大革命”中受冲击,1970年6月再任二机部副部长等职,1977年1月任二机部部长、党组书记。他领导和参与国家的原子能工业建设达二十余年。

戴光曦(1936-),北京人,满族,曾任近代物理研究所研究员,主要从事实验核物理研究。

顾金南,1996年退休,原中科院兰州近代物理所副研究员。

率差,束流也小,与国际上开展重离子物理研究的装置相比差距很大。要实现赶超,必须建造一台大型重离子加速器,实现从 H 到 U 的全离子加速。

## 2.1 工程预研和立项

1972年,杨澄中向国家科委和二机部提出,为了开展我国重离子核物理研究,并在这一领域赶超世界先进水平,建议在兰州近代物理所建造一台6米分离扇回旋加速器。之所以提此方案,主要是因为分离扇回旋加速器在理论上已经成熟,技术上困难不大,而且近代物理所在建造回旋加速器上已经有了一定的经验积累,国内也已基本具备建设所需的相关设备制造技术<sup>[2]140</sup>。杨澄中的建议得到了上级的支持。

1973年3月,为了加强基础科学研究,根据周恩来总理批示的文件,近代物理研究所由二机部划归中国科学院,确定以低能重离子核物理为主要研究领域,同时积极开展重离子应用研究。在这种情况下,近代物理所于9月向中国科学院正式提交建设大型重离子加速器的请示报告。中国科学院于次月原则上同意了该报告。

1975年,兰州重离子加速器的预研工作开始起步。随后,当时还只是助理研究员的魏宝文承担了分离扇回旋加速器离子轨道的非线性效应研究和重离子束的空间电荷效应研究两项预研任务。通过与罗诗裕合作,这两项课题都在一年内完成。结果表明,在所要加速的能区内,非线性效应很小,轨道是稳定的;而当束张度为微安级时,空间电荷效应更是可以忽略不计。这意味着建设方案的理论基础是可靠的。与此同时,科研人员完成了两块模拟磁铁的设计和加工任务,进而又做出了质量较高的横式模拟加速腔和高8米的竖式模拟加速腔,为物理设计提供了实验条件。另外,他们还在磁场垫补、高频加速腔、束

流动力学等方面的预研中突破了不少技术难关,初步掌握了研制分离扇回旋加速器的基本技术。

放射性污染问题是工程初步设计中需要特别考虑的问题。当时由于缺乏相关标准和规范,经历了较长时间的摸索。在1974年提出的初步设计方案中,工程人员估算了环境影响程度。由于正式设计工作尚未开始,所有参数尚未确定,所以放射性物质排放量的估算采用“在最大可能的基础上再加数倍”的保险估算法。1975年,根据物理设计中落实的工程参数,进一步核算了放射性物质的排放量。结果表明,该系统因中子活化空气产生的感生放射性气体最大浓度相当于国家防护规定剂量的0.9%。8月,甘肃省委同意大型重离子加速器在原有1.5米加速器基础上进行扩建。后来,甘肃省防疫站对工程的放射性物质排放量提出异议。11月,甘肃省科技局的贺进民带领省防疫站和近代物理所的人员到北京,与科学院、国务院和卫生部进一步讨论该问题,明确该加速器的环境影响低于国家允许标准,不会影响居民和职工健康。1976年6月,再次召开物理设计讨论会,确认该工程建成后放射性物质排放量低于国家标准,加以适当防护不会影响职工和居民健康。

1975年9月,中国科学院将“关于重离子加速器建造问题的报告”呈报国家计委,提出以近代物理所为主,一机部、四机部、七机部和甘肃省有关部门配合,共同建造一台分离扇回旋加速器。1976年4月,国家计委做出回复,建议加紧必要的模拟试验和预制研究,进一步充分论证后编报计划任务书,由中科院匹配经费把原1.5米回旋加速器改建成1.7米扇聚焦回旋加速器以作为注入器<sup>[15]</sup>。6月,设计任务书完成。建设项目除包含一台主加速器(分离扇回旋加速器)和一台注入器(由原1.5米回旋加速器改建的扇聚焦

罗诗裕(1940-),四川射洪人。1965年毕业于四川大学。曾担任重庆交通学院教授。主要从事固体物理、核物理和加速物理方面的理论研究。1977年,首次推导出了重离子加速器中粒子运动的非线性方程。

等时性回旋加速器)外,拟新建 $2\times 20$ 兆伏串列静电加速器,作为第二注入器<sup>[16]</sup>。11月,国家计委批复任务书,同意利用原有基础建造一台分离扇回旋加速器(代号7611工程),要求甘肃省根据工程进度为近代物理所增加300名人员。

此时,北京大学也提出了建设螺旋波导重离子加速器的方案。鉴于两个重离子加速器方案的关联性,中国科学院和教育部于1976年6月在北京联合召开了“重离子加速器物理设计讨论会”<sup>[17]</sup>。北京大学和近代物理研究所分别汇报了各自方案的物理设计。会议建议把两台重离子加速器都列为“五五”时期国家重点工程。后来,在物理学家陈佳洱的带领下,螺旋波导重离子加速器的研究团队研制成功了样机。

## 2.2 工程设计与建设

1977年,在杨澄中的领导和协调下,从所内各研究室和工厂以及所外兄弟单位调集近百名科技人员和工人充实到重离子加速器研究室、改器及串列静电加速器研究组,成立了7611工程处。9月,甘肃省革命委员会决定成立由茅林等十四名同志组成的7611工程领导小组<sup>[18]</sup>。此后,重离子加速器的设计和建造工作全面展开。

由于兰州重离子加速器设计方案类似于法国国家重离子加速器,因此后者具有直接参考价值。1976年,近代物理所组织人员到法国巴黎大学核物理研究所和法国国家重离子实验室学习。1978年10月,国务院副总理方毅出访法国时签订了“中法科技交流补充协定书”,约定法方参加中国重离子加速器的设计。基于此,近代物理所于12月邀请了四位法国专家来访,他们报告了法国国家重离子加速器技术设计的细节以及研制与设计中的经验教训,并对兰州重离子加速器研制设计面临的问题提出了建议。近代物理所据此对工

程设计和进度安排做了修改。1979年6月,魏宝文作为访问学者到法国国家重离子研究中心工作,一年中完成了13篇研究报告,都很有参考价值<sup>[8]56</sup>。

1980年底,基于预研基础的工艺设计工作基本完成,随即开始非标设备加工。11月,中国科学院在兰州召开了工程主体技术设计审查会,对主体三大部件(磁铁系统、高频系统、真空系统)的技术设计、第一注入器的改建设计和物理设计的修改设计做了审查<sup>[19]</sup>。需要指明的是,1979年下半年,中科院贯彻执行中央关于国民经济“调整、改革、整顿、提高”的八字方针,缩减了工程经费,决定缓建第二注入器。此后,兰州重离子加速器工程的建设任务就不再包含 $2\times 20$ 兆伏串列静电加速器了。

技术设计审查后,工程进入设备加工制造阶段。分离扇回旋加速器的主体设备和大部分配套设备基本都是非标准设备,其部件加工采取所内所外加工相结合的方法。2000吨主磁铁和束流输送系统、真空系统等加工由近代物理所附属工厂承担,高频发射机由四机部试制;而其他大件和精加工由一机部有关部门协助解决。此外,参加重要非标准设备协作生产和研制的单位还有第一重型机械厂、上海电机厂、西安整流器厂等多家单位。非标准设备常常需要进行艰难的研制。以磁铁系统所需的直流电源为例,该直流电源的长期稳定度要求为十万分之一和万分之一,研制难度很高,魏宝文和同事跑遍了大江南北寻找研制单位,最终落空,而从国外进口需花费巨额外汇,只能自行研制。研究员周嗣信带领几名科技人员,精心设计,反复试验,用国产元器件研制出不同规格的样机,其综合技术指标达到国际同类产品的先进水平,除满足重离子加速器工程需要外,后来还为北京正负电子对撞机和合肥同步

1979年4月,中共中央认为当时在经济工作指导思想上还存在“左”的错误,存在急于求成的倾向,追求不切实际的高指标和盲目扩大建设规模。这加剧了长期造成的经济比例失调的状况。同时,经济管理体制存在着许多缺陷,妨碍各方面积极性的发挥。针对这些情况,中共中央确定对国民经济实行“调整、改革、整顿、提高”的方针。

辐射加速器等重大科研工程提供了符合要求的电源<sup>[7]38</sup>。

土建工程由二机部的设计单位负责,于1979年10月破土动工。到1984年11月,主加速器大楼和6个子项工程等土建部分全部竣工。由于加速器工艺设备尚未全部到货安装,故国家计委委托中国科学院对土建部分先期进行了阶段验收。

1985年,主加速器各系统所需的加工设备陆续到货,7611工程进入安装调试阶段,先后完成主加速器真空试轴、高频锻炼、磁场垫补、注入引出和前束流线的调试工作。1987年5月7日,注入器改建成功,首次调出碳离子束。1988年春,束流诊断元件和束流探测器安装调试完成,自动控制系统的各个分控站投入使用。同年5月,工程建设进入联合调试阶段。调试中发现由于个别元器件和常规产品质量较差,致使故障频发,后将问题元器件修复后,运行状态得到好转。

1988年12月12日,作为主加速器的分离扇回旋加速器和作为注入器的1.7米扇聚焦回旋加速器都宣告建成并投入运行,主要技术指标达到国际先进水平。与其配套的在线同位素分离器、重离子飞行时间谱仪等8个大型重离子物理实验研究装置以及公用设施也于1989年全面建成并投入使用<sup>[3]58</sup>。1989年9月,国家科委委托中国科学院对工程进行技术鉴定<sup>[20]</sup>。11月7日~12日,国家计委对工程进行技术鉴定和竣工验收。验收委员会认为:“7611工程地处西北,条件比较艰苦,在各级主管部门的领导和各方面的支持下,经过近物所和全国100多个单位的自力更生,艰苦奋斗,团结协作,共同攻关,精心设计,精心建造,终于建成了目前我国规模最大,加速离子种类最多,能量最高的重离子加速器。这是我国高技术领域中又一次重大成就。验收委员会同意竣工验收,交付使用。”<sup>[21]</sup>1992年,兰州重离子加速器建造工程获国家科技进步一等奖。

1989年12月31日,国家科委向中国科学院颁发“兰州重离子加速器”科技成果鉴定证书<sup>[22]</sup>。

为促进核物理的研究及交叉学科的发展,并吸引、聚集和培养核物理方面的国际一流人才,获得国际竞争力,国家计委于1991年8月批准成立兰州重离子加速器国家实验室,向国内外近百所高等院校和科研单位开放。此后,科技人才不断向兰州凝聚,促使兰州逐渐成为我国重离子物理的研究“高地”。

后来,兰州重离子加速器进一步建成了一系列束流线,促进了相关研究的深化。例如,1993年建成我国第一条、世界第五条中能放射性束流线,成功获得氦、锂、铍等元素的30余种放射性核素;1997年又建造了具有国际先进水平的中能重离子弹核碎裂型放射性束流线<sup>[12]54</sup>;2006年建成的超导高电荷态ECR离子源,使兰州重离子加速器束流强度显著提高。

### 3 冷却储存环的建设

20世纪90年代,国际重离子物理研究有了新动向,极端条件下核物质性质研究及非核自由度研究成为原子核物理的前沿,国际上重离子加速器开始向“放射性束、高品质重离子束、高能直至相对论重离子的加速”三个方向发展。为了适应新的研究形势,同时促进相关交叉学科和高新技术的发展,经过反复酝酿、预研和论证,近代物理所拟在兰州重离子加速器基础上建造多用途的冷却储存环。冷却储存环能够提供更高能量、更高品质、更宽束流能量范围和更多种类的束流(特别是滴线核),从而支撑放射性核束物理、高温高密核物质性质、高离化态原子物理和高品质重离子束等方面的研究。该方案既能够让近代物理所紧随国际原子核物理的前沿研究,又能够促进我国交叉学科和高新技术的发展,服务于甘肃的经济社会发展。

#### 3.1 工程预研和立项

1992年2月,在时任近代物理所所长、兰州重离子加速器国家实验室主任魏宝文倡导下,成

立了由夏佳文等3名博士生组成的研究小组,开展冷却储存环工程的调研工作。1993年,研究小组先后与到访的德国重离子研究中心(GSI)安格特(N. Angert)教授、高能物理研究所张闯研究员、中国科技大学刘祖平教授、美籍高能物理加速器专家邓昌黎教授等讨论了冷却储存环工程方案。1994年4月,《兰州重离子加速器冷却贮存环HIRFL-CSR》一书出版,论证了在重离子加速器上增建重离子冷却储存环的必要性及可行性,同时给出了较为清晰的工程方案<sup>[23]</sup>。同年8月~11月,近代物理所与日本理化学研究所、东京大学核物理研究所、俄罗斯杜布纳联合核子所合作,进行了电子冷却与重离子束积累的理论模拟和预研实验。

1995年开始,中国科学院陆续为冷却储存环工程提供了1342万元预研经费,其中989万元的预研设备可作为冷却储存环设备中的一部分。基于预制研究,冷却储存环工程方案逐渐清晰,明确了冷却储存环工程由主环和实验环构成,建成后的冷却储存环主环周长161.20m,实验环周长120.90m,是一个集加速、累积、冷却、储存及内靶实验于一体的多功能实验装置。

1994年5月,中国科学院基础局召开会议,比较了中国原子能科学研究院建造“北京放射性核束装置”的建议和近代物理所建造冷却储存环工程的建议,考虑到兰州近代物理所的方案覆盖更多的重大物理问题,特色与创新也较多,并已做了充分调研和准备,建议考虑支持兰州近代物理所的冷却储存环工程方案。1995年2月,国家科委召集项目论证会,对冷却储存环给出了否定性结论。对此,高能物理所研究员许建铭于4月2日致信中国科学院有关领导,认为会上“并未就该工程的先进性和当前国际重离子物理的前沿领域发展动向进行充分论证,少数专家对此也缺乏了解,提出了一些与实际情况完全不符的意见,对冷却储存环方案与北京放射性核束装置的对比得出了一些不科学、不公正的结论”<sup>[24]</sup>。他还具

体比较了放射性束核装置和重离子加速器冷却储存环的优劣:冷却储存环方案的投资效益比要高得多,各项指标可全面达到国际先进水平,而且北京正负电子对撞机和合肥同步辐射光源建造积累的储存环建设经验可以转用于冷却储存环建造,相比而言,放射性束核装置初期投资虽较少,实际上是投资大,效益低,只能达到国外当时小型装置的水平,不能依靠它在下世纪初赶上国际水平。4月3日,时任近代物理所所长罗亦孝和兰州重离子加速器国家实验室主任魏宝文也联名致信国家计委科技司,驳斥了评审会上形成的一些错误结论。上述信件得到了有关部门的重视,并在冷却储存环立项决策中发挥了作用。8月23日,冷却储存环的建议书完成并上报国家计委。1996年,建议书通过国家计委组织的专家咨询。1997年6月,国家科技领导小组原则批准项目立项,同意确定“兰州重离子加速器冷却储存环工程”项目入选“九五”第二批国家重大科学工程。而北京放射性核束装置则于2003年7月经国防科工局批准立项,于2016年10月通过国防科工局竣工验收并投入使用。

### 3.2 工程设计和建设

1997年10月,中国科学院受国家计委委托对冷却储存环工程项目建议书进行评估,专家组建议与国外有关单位展开有针对性的专题合作研究,引进国外的先进技术,增加工程建设的把握性<sup>[25]</sup>。1998年4月,中国国际工程咨询公司给出了工程项目建议书的评估报告,建议国家计委批准该建议书,同时也认为,“设计方案还有进一步优化的必要,如真空度指标的确定、磁铁孔径和线圈电流密度的选择以及与加速器的流强有关的各个环节的效率等”<sup>[26]</sup>。7月,冷却储存环工程项目建议书获国家发展计划委员会批准<sup>[27]</sup>。

随着工程方案的逐步完善,工程投资的估算也有所变动:借鉴德国在电子冷却系统设计方面的成功经验,修改了原有设计,两套电子冷却系

统的最新询价为 2600 万元,大大超过了原先估算(980 万元);借鉴德国 GSI 的经验教训,在原有设计基础上适当加大了实验环的接收度,相应增大磁铁的立体角和真空管道的孔径,总投资增加了 1000 多万元;在冷却储存环上增加了必要的真空与射流诊断设备,对主环和实验环进行调整,两个环的周长均增加了约 20 米,使总投资增加了约 1000 多万元;由于物价上涨,其他部分投资增加了约 30%。因此,工程总预算从 1995 年的 1.95 亿增加到 1997 年的 2.98 亿元<sup>[28]</sup>。

1998 年 11 月,冷却储存环工程可行性研究报告通过中国科学院组织的专家评估<sup>[29]</sup>。1999 年 1 月,受国家计委委托,中国国际咨询公司组织专家对可行性研究报告进行了评估,认为通过优化改进,该工程整体方案更趋于合理和完善,建议总投资按 2.935 亿元控制,建设工期为 5 年<sup>[30]</sup>。同年 8 月,可行性研究报告通过国家计委审批。

为了配合工程的可行性研究,近代物理研究所委托多家单位进行工程的环境评估。1999 年 2 月 1 日,中国原子能研究院和核工业第二研究设计院对冷却储存环环境影响报告书(可行性研究阶段)给出评审意见<sup>[31,32]</sup>。2 月 9 日,中国辐射防护研究院也给出了评审意见<sup>[33]</sup>。当日,国家环保总局在北京召开冷却储存环工程环境影响报告书的评估会,认为该报告书采用的管理限值和公众个人剂量目标值符合国家和行业的有关规定,其对环境的影响很低的结论可以接受。2 月 28 日,国家环保总局接受这次评估会的评估意见,批复了环境影响报告书,同时提出部分数据和信息的补充要求<sup>[34]</sup>。修改后的环境影响报告书再次上报并获批通过。

1998 年,近代物理研究所与德国 GSI 签订合作协议。根据协议,近代物理所每年派专业人员去 GSI 交流学习。工程总体设计小组于 1999 年 4 月赴 GSI,与德国专家讨论了冷却储存环总体设计方案。5 月,GSI 的安格特和斯特伊克(M Steck)

访问近代物理研究所,审核了各分系统的设计方案,就工艺设计提出了建议,并就 GSI 在某些关键技术和设备方面为冷却储存环提供支持达成初步协议。1999 年底,近代物理所又与俄罗斯布德科尔核物理研究所(BINP)达成了长期合作协议,并就冷却储存环电子冷却装置的研制签署了合作计划。2000 年 3 月,近代物理所组织有关人员再赴俄罗斯,就共同研制冷却储存环主环加速腔和射频堆积腔与俄方达成合作协议,并就共同研制注入引出器件达成意向性协议。可以说,与德国和俄罗斯的合作推进了设计方案的不断成熟。

根据最终设计方案,工程建设包括主环、实验环、束流线和核物理探测装置,以及配套的建筑安装工程等,建设期 5 年,总投资 2.935 亿元。1998 年 11 月 3 日,中国科学院成立项目管理委员会、项目工程指挥部及项目科学技术委员会,詹文龙任工程指挥部总经理,夏佳文任总工程师<sup>[35]</sup>。1999 年 12 月 10 日,举行了开工奠基仪式<sup>[36]</sup>。2000 年 4 月 25 日,国家计委正式批准冷却储存环工程开工报告<sup>[37]</sup>。

紧接着,工程相关设备的加工、安装和调试工作全面展开。通过邀请招标选择加工厂家的方式完成了许多非标设备的制造。到 2001 年 1 月,已经完成了 C 型弯曲磁铁、二极铁真空室和脉冲二极铁电源的样机制造。2002 年 4 月,开始改建重离子加速器原实验大厅,进行旧设备的拆除、新加工的磁铁、电源、真空管路等设备的安装和改造。某些难度很大且国内缺乏设计经验的核心设备,包括电子冷却、大容积超高真空系统、宽频带高频加速腔等,在研制过程中积极向国外学习或者联合研制,例如电子冷却装置就是由近代物理所和俄罗斯新西伯利亚核物理研究所合作研制的。到 2003 年 12 月,冷却储存环工程完成了主环主要设备的安装任务。2005 年,开始进行系统总调。2006 年 1 月,主环实现了束流的储存。

冷却储存环工程土建部分的设计由中国科学

院北京设计研究院完成。此前,中国科学院北京设计研究院已完成过北京正负电子对撞机、中国科技大学同步辐射加速器、合肥托克马克装置、北京大面积天区望远镜等多个大科学工程项目土建部分的设计工作。2001年9月25日,冷却储存环土建工程通过竣工验收。

国内外专家的献计献策为冷却储存环工程建设提供了重要保障。1999年8月,由来自德国、日本、瑞典和俄罗斯等国的七位加速器专家组成的国际顾问委员会成立,安格特为委员会主任。在工程建设期间,国际顾问委员会定期召开会议,讨论下一步工作方案和主要的技术问题。从2000年到2005年,共组织了六届冷却储存环国际顾问委员会会议<sup>[38]</sup>。在2005年10月18日举行的第六届会议上,提出了电源噪声和纹波的抑制等十余个亟待解决的问题。另外,在工程建设期间,逐步形成了现场问题及时解决的机制。例如,实验室学术委员会会议在工程建设期间定期召开,为工程建设中的实际问题提出建议。在2004年8月的会议上,专家就HIRFL-冷却储存环束流时间分配方案、冷却储存环和HIRFL改造、冷却储存环调束方案和准直安装等有关问题提出了建设性意见。

2007年10月7日,冷却储存环实验环调束取得重大进展,储存束流的强度超过了设计指标,创造了国际回旋加速器+冷却储存环组合系统加速离子种类、最高能量和束流强度的新纪录。2008年1月10日,冷却储存环主环成功实现慢引出,这是我国离子同步加速器首次实现慢引出。2008年7月30日,冷却储存环工程通过了由国家发展改革委组织的国家验收。验收认为:“该工程全面优质完成了建设任务,实现了验收指标,其中主环加速碳、氦束流的能量和流强超过了设计指标,使我国第一台大型重离子加速器冷却储存环达到了国际先进水平。”<sup>[39]</sup>

在工程建设过程中,近代物理所还利用中

院知识创新工程资助项目,对装置做了冷却储存环工程建设内容之外的提升和改进。为了提高HIRFL加速极重离子的束流强度,2000年,中科院批准近代物理研究所研制超导高电荷态ECR离子源。经过近5年努力,建成了在磁场设计和结构方面都有所创新的超导ECR离子源。与此同时,还开展了强流电子加速器、320kV高压重离子应用研究装置的研发,上述装置分别于2004年和2007年完成。

#### 4 HIRFL 装置的科学成就与历史经验

自1.5米回旋加速器建成以来的半个世纪里,HIRFL边扩建边运行,成为国内最大、国际上重要的重离子研究装置(见图1)。依托该装置,成立了兰州重离子加速器国家实验室,汇聚了以重离子物理为核心的多学科人才,面向国家经济社会发展的重大需求,开展了重离子物理相关的基础研究、技术开发、仪器研制和产业培育,形成了装置-人才-技术-产业的互动发展局面。

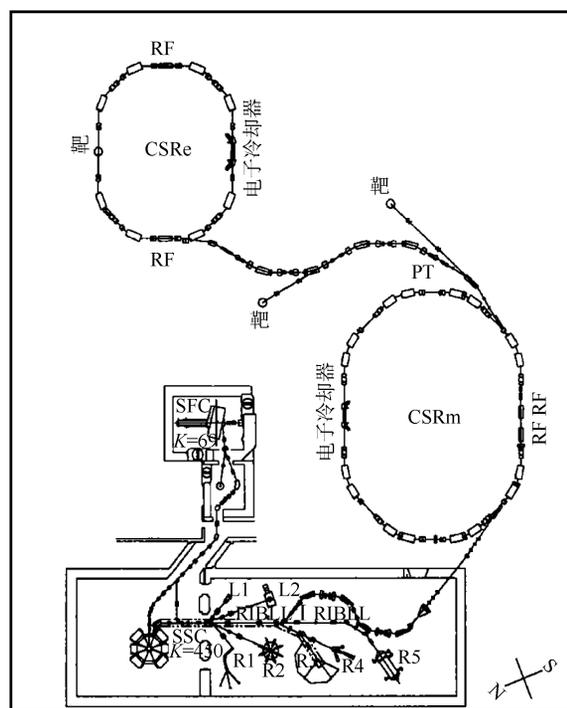


图1 HIRFL 的总体布局示意图  
(图片来源:文献[40])

HIRFL 装置的科学成就包括以下两大方面。首先, 近代物理研究所利用该装置完成了一系列国防科研任务, 实现了我国新核素合成“零”的突破, 首次合成包括两种超重新核素在内的 26 种新核素, 并首次测定了两个重要核素  $^{153}\text{Er}$  和  $^{157}\text{Yb}$  较完整的衰变纲图; 完成了原子核质量精确测量; 建成我国第一条中能次级束流线, 并且在低能重离子碰撞和热核性质研究以及重离子束应用研究等方面取得了一批重要成果, 使我国在核结构、重离子碰撞和热核性质方面的研究进入国际前沿; CSR 实验环实现了高精度原子核质量测量, 并推动了天体核物理相关研究。其次, 该装置带动交叉学科和先进技术的发展。依托该装置建成了单粒子效应地面模拟实验平台, 为航天器的安全运行提供了重要的技术保证; 带动了超导和常规高精度磁铁技术、超高真空技术、大功率高精度电源技术等高技术发展, 自行研制了 DG 系列电子加速器, 满足了国内的工业需求; 生产了精密筛分材料——核孔膜并开发了相关产品; 农业方面, 开发了重离子束诱变育种技术与甜高粱循环经济产业, 产生了可观的经济效益; 重离子治癌方面, 基于大量放射物理、放射生物学实验以及重离子治疗技术的开发, 研发制造了世界上周长最小的医用重离子加速器系统, 并于 2006 年开始临床试验, 取得了显著疗效。总体而言, HIRFL 装置提高了我国先进离子加速器物理及技术和核物理及相关学科的国际地位, 增强了我国在重离子物理及其交叉学科国际前沿领域的竞争力, 同时带动了交叉学科、先进技术和产业的发展<sup>[41]</sup>。截至 2016 年, 近代物理研究所共取得科研成果 660 多项, 其中获国家奖 17 项、省部级奖 158 项<sup>[42]</sup>。

可以说, HIRFL 50 余年的建设历程是我国大科学工程建设能力不断提升的缩影。20 世纪 50 年代, 我国设计和建造大科学装置的经验基本是空白, 1.5 米回旋加速器是苏联援建的。到了 80

年代, 虽然已经积累了一定的加速器建设工程经验, 但相比国外还存在很大差距, 而重离子加速器的建设实现了我国该领域的技术追赶。进入 21 世纪, 随着我国经济技术条件的日益改善, 立足于已经积累起来的丰富的加速器设计、建造和运行经验, 近代物理研究所在更高的起点上设计和建造出更具国际水准的冷却储存环, 说明已经具备了很强的工程能力。根据对 HIRFL 建设的历史考察, 可以引出以下三点经验。

第一, 只有在国家重大需求和科学前沿发展的交叉点上做文章, 才能找到大科学工程的准确定位。1.5 米回旋加速器的主要建设目标是服务于国家的核武器与核工业发展, 同时对我国核物理研究的起步发挥基础作用。重离子加速器的建设主要是为了追赶国际重离子物理研究的步伐, 走向国际重离子研究的前沿, 但对我国核工业的发展也有很大支撑作用。冷却储存环的建设则具有紧随国际原子核物理研究前沿、促进交叉学科和高新技术发展、和服务于经济社会发展等多重工程目标。可见, 装置的工程建设与当时的国家需求、核物理研究需求息息相关, 因而才能得到国家的重视和持续支持。

第二, 只要通过累积式大科学装置建设来凝聚科技人才, 偏远地区也可以成就科学高地。兰州地处我国西北腹地, 最初由于核武器研制被选为核物理研究基地之一, 随后通过跨越 50 余年的彼此关联的大科学装置建设, 组建了重离子物理领域的国家实验室, 形成了我国重离子加速器研究的实验平台。杨澄中作为开拓者, “为兰州物理研究室(所), 以至重离子物理研究基地的建设做了许多建基立业和前瞻远眺性的工作”<sup>[2]257</sup>。历经杨澄中(1956~1984 年(相关工作年限, 下同))、魏宝文(1984~1994 年)、罗亦孝(1994~1999 年)、詹文龙和夏佳文(1999~2008 年)等几代人的发展, 兰州近代物理所从重离子物理研究的物质基础、技术基础和人才基础着手, 凝聚和造就了一

支顶尖的重离子物理研究和加速器建造科技队伍,形成了加速器装置设计与核物理科技队伍之间的良性互动,打造出了近代物理所特有的研究传统和技术传统,使得位于偏远地区的兰州成长为我国核物理研究的高地。

第三,千方百计促成跨国知识流动,是成就大科学工程的关键。在HIRFL的建设中,1.5米回旋加速器的建设离不开苏联的援助,分离扇回旋加速器的建设得到法国的大力支持,而冷却储存环的建设更是与德国、俄罗斯和日本等多国的支持有关。在缺少经验、技术和人才的情况下,通过参会、引荐、访问、讲学等方式建立了国际联系,积极学习借鉴国外先进技术和经验,是HIRFL建设成功的基本要素。大科学工程是基于科学又服务于科学的工程,而科学是无国界的,而且科学的评价标准在国际上只有一个,加之我国大科学工程设计和建造能力相比国外还有差距,因此我国大科学工程的立项、建设和运行都必须扎根于国际科学界和跨国知识交流网络。

## 参考文献

- [1] 原子能科学研究院编. 中国原子能科学研究院简史(1950-2010)[M]. 原子能出版社, 2010, 08: 4-8.
- [2] 邬恩九. 忆中国科学院近代物理研究所的历史变迁和杨澄中先生的科学人生[M]. 兰州: 甘肃人民出版社, 2016.
- [3] 中国科学技术协会编. 中国科学技术专家传略(理学编, 物理学卷2)[M]. 中国科学技术出版社, 2001: 52-62.
- [4] 政协甘肃省委员会文史资料委员会编. 甘肃文史资料选辑第36辑[M]. 甘肃人民出版社, 1993: 1-5.
- [5] 裴元璋. 兰州文史资料选辑第15辑[M]. 甘肃人民出版社, 1995: 247-251.
- [6] 杨澄中. 我的核物理生涯[J]. 物理教学, 2008, 30(12): 6, 13.
- [7] 咏芝. 攀登核科学高峰的人——记八届全国人大代表甘肃省第八届人大代表、中科院兰州分院院长、核物理学家魏宝文[J]. 人大研究, 1994(10): 36-40.
- [8] 岳海奎. 拳拳赤子心 殷殷报国情——记核物理学家魏宝文[J]. 发展, 1996(4): 55-56.
- [9] 谢远景. 夏佳文的“加速”人生[J]. 中国科技奖励, 2008(5): 52.
- [10] 岳海奎. 灵魂与重离子的撞击——记中科院近代物理所研究员詹文龙[J]. 中国科学院院刊, 1998(4): 298-301.
- [11] 王健. 科技骄子 国之菁华——记中国科学院近代物理研究所所长詹文龙[J]. 党的建设, 2001(5): 4-7.
- [12] 岳海奎. 蟾宫折桂 情证今生——记中科院近代物理所研究员詹文龙[J]. 发展, 2001(8): 52-54.
- [13] 钱三强, 朱洪元. 新中国原子核科学技术发展简史1950-1985//中国原子能科学研究院编著. 钱三强与中国原子能事业[M]. 中国原子能出版社, 2013: 182.
- [14] 《中国科学院》编辑委员会编. 中国科学院(上)[M]. 当代中国出版社, 香港祖国出版社, 2009: 311-316.
- [15] 关于建造重离子加速器建造问题的复文[G]. 档案号: 7611-H-1, 兰州: 中国科学院近代物理所档案室, 1976: 01.
- [16] 关于重新报送设计重离子加速器设计任务书的报告[G]. 档案号: 7611-H-1, 兰州: 中国科学院近代物理所档案室, 1976: 12.
- [17] 重离子加速器物理设计研讨会会议纪要[G]. 档案号: 7611-H-1, 兰州: 中国科学院近代物理所档案室, 1976: 66.
- [18] 关于成立7611工程领导小组的通知[G]. 档案号: 7611-H-1, 兰州: 中国科学院近代物理所档案室, 1977: 82.
- [19] 7611工程主体技术设计审查会议纪要[G]. 档案号: 7611-H-1, 兰州: 中国科学院近代物理所档案室, 1980: 95.
- [20] 关于对“兰州重离子加速器”组织技术鉴定事的复函[G]. 档案号: 7611-H-1, 兰州: 中国科学院近代物理所档案室, 1989: 161.
- [21] 7611工程竣工国家验收鉴定书[G]. 档案号: 7611-H-81, 兰州: 中国科学院近代物理所档案室, 1989: 03.
- [22] 关于颁发兰州重离子加速器科技成果鉴定证书的通知[G]. 档案号: 7611-H-1, 兰州: 中国科学院近代物理所档案室, 1989: 183.
- [23] 中国科学院近代物理研究所, 兰州重离子加速器国家实验室. 兰州重离子加速器冷却贮存环 HIRFL-CSR[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1994.
- [24] 关于转发徐建铭先生对CSR对BRNBF意见的函[G]. 档案号: CSR-ZH-1-4, 兰州: 中国科学院近代物理所档案室, 1995: 11.
- [25] 中国科学院文件关于兰州重离子加速器冷却储存环工程项目建议书的评估报告[G]. 档案号: CSR-ZH-2-3, 兰州: 中国科学院近代物理所档案室, 1997: 14.
- [26] 中国国际工程咨询公司文件关于兰州重离子加速器冷却储存环工程项目建议书的评估报告[G]. 档案号: CSR-ZH-2-3, 兰州: 中国科学院近代物理所档案室,

- 1998: 01.
- [27] 国家发展计划委员会关于兰州重离子加速器国家重大科学工程项目建议书的批复[G]. 档案号: CSR-ZH-2-1, 兰州: 中国科学院近代物理所档案室, 1998: 03.
- [28] 关于 HIRFL-CSR 投资估算的说明[G]. 档案号: CSR-ZH-2-3, 兰州: 中国科学院近代物理所档案室, 1997: 28.
- [29] 关于兰州重离子加速器冷却储存环国家重大科学工程项目可行性研究报告的评估报告[G]. 档案号: CSR-ZH-2-6, 兰州: 中国科学院近代物理所档案室, 1998: 10.
- [30] 关于兰州重离子加速器冷却储存环工程可行性研究报告的评估报告[G]. 档案号: CSR-ZH-2-6, 兰州: 中国科学院近代物理所档案室, 1998: 04.
- [31] 对《兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)环境影响报告书(可行性研究阶段)》的评审意见[G]. 档案号: CSR-ZH-2-7, 兰州: 中国科学院近代物理所档案室, 1999: 179.
- [32] 兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)环境影响报告书(可行性研究阶段)评审意见[G]. 档案号: CSR-ZH-2-7, 兰州: 中国科学院近代物理所档案室, 1999: 181-183.
- [33] 对《兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)环境影响报告书(可行性研究阶段)》的评审意见[G]. 档案号: CSR-ZH-2-7, 兰州: 中国科学院近代物理所档案室, 1999: 175.
- [34] 关于兰州重离子加速器冷却储存环工程环境影响报告书的批复[G]. 档案号: CSR-ZH-2-7, 兰州: 中国科学院近代物理所档案室, 1999: 01.
- [35] 关于成立国家重大科学工程“兰州重离子加速器冷却储存环”项目有关机构的通知[G]. 档案号: CSR-ZH-4-4, 兰州: 中国科学院近代物理所档案室, 1998: 177.
- [36] 兰州重离子加速器冷却储存环国家重大科学工程开工奠基仪式[G]. 档案号: CSR-ZH-4-5, 兰州: 中国科学院近代物理所档案室, 1999: 01.
- [37] 国家计委关于兰州重离子加速器冷却储存环工程开工建设的批复[G]. 档案号: CSR-ZH-4-4, 兰州: 中国科学院近代物理所档案室, 2000: 03.
- [38] 历届 CSR 国际顾问委员会会议纪要[G]. 档案号: CSR-ZH-4-6, 兰州: 中国科学院近代物理所档案室, 2005: 1-59.
- [39] 国家重大科学工程兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)竣工验收意见[G]. 档案号: CSR-ZH-5-24, 兰州: 中国科学院近代物理所档案室, 2008: 01.
- [40] 王义芳. 兰州重离子加速器的状态和发展[J]. 物理, 2001(6): 356-360.
- [41] 李 斌, 李思琪. 兰州重离子加速器经济社会效益调研[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2015, 7(1): 3-15.
- [42] 夏佳文, 詹文龙, 魏宝文, 等. 兰州重离子加速器研究装置 HIRFL[J]. 科学通报, 2016, 61(Z1): 467-477.

## A Historical Investigation of Construction of the Heavy Ion Research Facility at Lanzhou

Li Xiubo, Wang Dazhou

(School of Humanities, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The construction of the Heavy Ion Research Facility at Lanzhou (HIRFL) spanned a period of over 50 years. Based on archives, several biographies, interviews, and news reports, this study investigates the three construction periods of the HIRFL in detail. It describes the construction process of the 1.5m Cyclotron, the Separated Sector Cyclotron and the Cooler Storage Rings, and analyzes the strong supporting effect of HIRFL on science and technology development in related fields. Finally, the authors attempt to draw specific experiences from related aspects including orientation, layout and transnational knowledge flow of the Large Scale Scientific Facilities construction.

**Key Words:** institute of modern physics; 1.5m cyclotron; the separated sector cyclotron; the cooler storage ring; engineering history