

# 忆35MeV质子直线加速器的工作收获

徐韬光

(中国科学院高能物理研究所 100049)

1997年夏季,我从学校毕业即来到所里质子直线加速器及应用研究室参加工作。自身状态从学生转变为研究所的职工。到室里后,室主任孔登明,书记乔际民及室里同事多方位向我介绍质子直线加速器及应用室与北京35 MeV质子直线加速器(Beijing Proton Linac, BPL)的历史,让我尽快融入工作环境。

## 一、35 MeV 质子直线加速器的前身

直线加速器特指一种利用射频电磁场将带电粒子沿直线轨道进行加速的一类粒子加速器。质子直线加速器是核物理和粒子物理实验装置的重要组成部分,常用作高能加速器的注入器,也可以采用全能量质子直线加速器直接用于原子核物理研究、散裂中子源和驱动次临界反应堆,并可应用于肿瘤治疗、同位素生产和质子照相等领域。

1973年高能所成立后,提出建造高能质子加速器的计划,质子直线加速器是其中的注入器。1975年3月国家批复了《关于加速器预制研究和建造问题的报告》,计划在1985年建成40GeV高能加速器实验基地,代号为“七五三”工程。其中加速器的布局是:750 keV 预注入器—50 MeV 直线加速器—1 GeV 增强器—40 GeV 同步加速器。同时,在高能所(玉泉路)建设预制研究基地,其中包括质子直线加速器实验厅(1号厅)。但是囿于国内形势,此工程硬件设备方面未实质性启动。1977年11月,中央批准“关于加快建设高能物理实验中心的请示报告”(科发(1977)委字1号文),决定加快建造一台

30 GeV 质子同步加速器,工程简称“八七”工程。工程中加速器的布局是750 keV 预注入器—200 MeV 直线加速器—30GeV 同步加速器。1978年3月又决定将同步加速器的能量从30 GeV 提高到50 GeV。1979年,根据国民经济调整、改革、整顿、提高的方针,“八七”工程的完成期限从1982年推迟到1987年。对加速器的方案再次进行了修改,新的布局是:750 keV 预注入器—93 MeV 直线加速器—2 GeV 增强器—50 GeV 同步加速器。1980年底“八七”工程下马,但其注入器的第一加速腔(质子束能量可达10 MeV)及其前端的研制工作已全面展开,许多技术难关被逐一攻克,各系统的设备已投入加工。1981年5月,国家科委“八七”工程指挥部和中科院物理数学部联合召开质子直线加速器应用研究讨论会,决定将10 MeV 加速器延伸到35 MeV。这样可以利用这台我国当时能量最高的质子加速器开展医用短寿命同位素的生产 and 快中子治癌的研究,填补我国在这两方面的空白,同时还可以开展相应的基础和应用基础研究。1982年3月,所里启动对撞机工程预制研究,为了适应新形势,所里调整了加速器和实验物理各研究室机构,新设立电子直线加速器研究室、储存环研究室、质子直线加速器及应用研究室、自动控制及束流测量研究室、第一实验物理研究室、第二实验物理研究室,撤销原有各室。1983年4月,国务院批准国家计委《关于审批2×22亿电子伏正负电子对撞机建设计划的请示报告》,工程包括两项建设内容,新建一台能量为2×22亿电子伏正负电子对撞机;将在建的

10 MeV 质子直线加速器扩展到 35 MeV。同期,所里召开质子直线加速器动员大会,有关所领导要求:今后不仅要“成器”,建成加速器;还要“成材”,出又红又专的人才;还要“成风”,培养团结战斗的优良作风。第一任室主任周清一代表全室 108 位同志表态,要“思想稳定、充满信心,奋勇前进。”

## 二、35 MeV 质子直线加速器

1985 年 8 月,35 MeV 质子直线加速器首次调试出束。1989 年 5 月,北京 35 MeV 质子直线加速器通过中国科学院组织的技术鉴定。据 35 MeV 质子直线加速器建成后的不完全统计,在建造这台加速器的过程中,通过攻关而涌现出来的新技术、新工艺、新材料等就有 50 多项。它们对于提高我国工业技术水平,起到了积极作用。

35 MeV 质子直线加速器及其应用研究工程,由 35 MeV 质子直线加速器、中能束流运输系统、同位素制备实验室和快中子治癌研究实验室四个单项工程组成(见图 1 工程平面布置图)。占地面积约 12 亩。加速器厅的建筑面积为 5043 平方米。应用研究厅的建筑面积为 2630 平方米,总建筑面积为 7673 平方米。第一期工程(10 MeV 加速器)的总投

资为 2417 万元。第二期工程(将 10 MeV 加速器延伸至 35 MeV 及应用研究工程)的总投资为 1232 万元,因此两期工程总投资为 3649 万元。其中第一期工程加速器(10 MeV)设备投资 2079 万元,第二期工程中设备投资 311 万元,因此 35 MeV 加速器设备总投资为 2400 万元。

35 MeV 质子直线加速器由预注入器、低能输运线、DTL 加速器、中能输运线及应用线、高频功率源、磁铁电源系统、控制系统、束流测量系统、真空系统及水冷系统组成。其中预注入器由高压发生器、高梯度加速管和强流脉冲离子源组成。预注入器的输出质子能量为 750 keV,脉冲流强达 200 mA,归一化发射度(70%粒子) $<3.0\pi$  mm-mrad。加速管的内径 600 mm,长 2 m。离子源为双等离子源,工作气体为氢气,采用改进的氧化物阴极,寿命可达 500 小时以上。整个预注入器大厅约 11×19×12 米。低能输运系统是预注入器及 DTL 加速腔之间的束流运输通道,全长 6.5 米,由 17 块四极磁铁、聚束腔、导向线圈及束测探头组成。DTL 加速器,采用漂移管型加速结构,是 35 MeV 质子直线加速器的加速主体。其输出质子能量 35 MeV,脉冲峰值流强稳定运行 40 mA。DTL 腔直径约 1 m,全长约

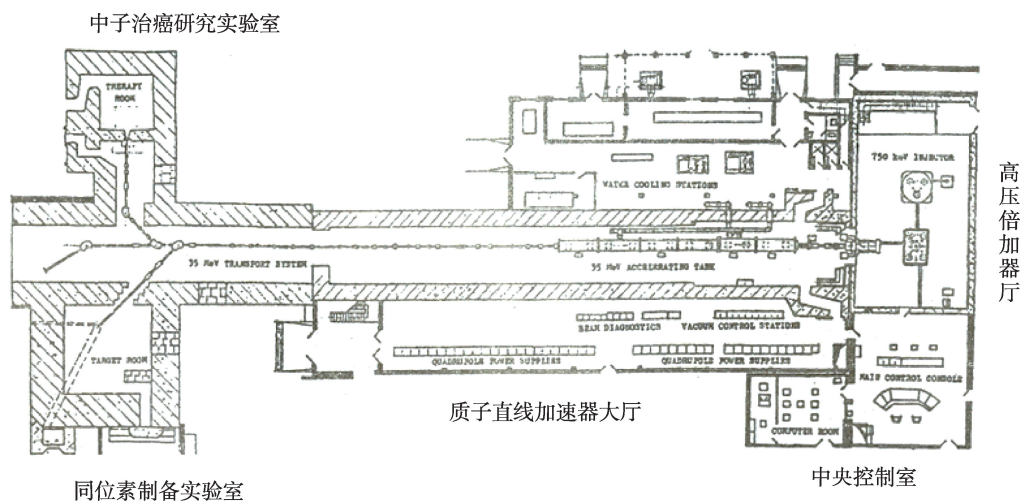


图 1 工程平面布置图(一号厅局部)

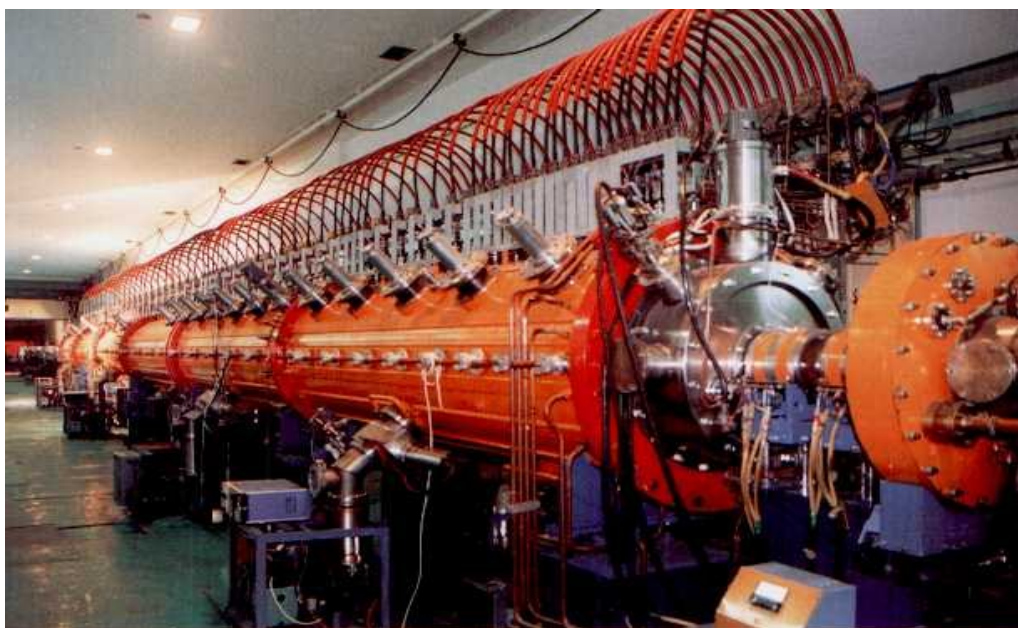


图2 BPL-DTL加速腔

21米,是单物理腔DTL加速器,有6节工艺段构成。内装 $103+2\times 0.5$ 个漂移管,每个漂移管中装有一电四极透镜,采用FD聚焦结构。加速腔体由铜钢复合板经卷筒、焊接和精加工后制成。空腔Q值达86000,制造质量达国际水平。中能输运系统,全长为60米,由偏转磁铁、分析磁铁、聚焦磁铁、束测探头、导向线圈、真空泵及真空阀门组成。在中能输运线的末端,分出三条应用线,快中子治癌研究线、医用短寿命同位素线、物理线。高频功率源,它是一台工作频率为201.25 MHz,输出脉冲功率达5 MW的高频发射机。其他系统如水冷系统主要有两台200 kW的FJZ系列冷水机组组成,对一次冷却水的入口温度可控制在 $\sim\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 左右;真空系统,由机械泵、分子泵、溅射离子泵组成,可保证加速腔真空度优于 $5\times 10^{-7}$  Torr;磁铁电源系统为电四极透镜、导向铁、偏转铁提供电源。四极磁铁电源输出达200-500 A,脉冲平顶宽度大于500  $\mu\text{s}$ ,稳定度达 $\pm 0.3\%$ ,偏转和分析磁铁采用直流电源,最大输出电流为100 A,稳定度达 $\pm 0.01\%$ ;控制系统有中央

控制台及CAMAC接口柜通过接口系统使若干分系统与中央控制台相连,对加速器的运行产生主控制定时,并对磁铁电源系统进行调节及控制,还有安全连锁保护装置;束流测量系统,包括16套束流强度测量仪、2套阻拦型发射度测量仪、10套束流截面测量仪及1套能谱测量仪等。

### 三、35 MeV 质子直线加速器取得成果

35 MeV质子直线加速器建成后,在历任室主任周清一、王书鸿、孔登明领导下,其自身及应用领域取得许多成果。35 MeV质子直线加速器科研工程的第一期成果(10 MeV),获中科院科技进步一等奖(1986);其高频功率源系统的设计和建造,获中科院科技进步二等奖(1987);加速器的物理设计和研究成果,获中科院科技进步二等奖(1986)及国家级科技进步三等奖(1987)。1989年5月,北京35 MeV质子直线加速器通过中国科学院技术鉴定。鉴定认为,加速器已全面达到或优于设计指标。证明它的设计、建造、安装和调试都是正确成功的,并达到

同类机器的国际先进水平,获1990年中科院科技进步一等奖、获1991年国家科技进步一等奖。

与加速器同时建成的医用短寿命同位素制备实验室,包括自动装卸靶系统、两条同位素生产线及完整的同位素质量检测设备,为我国生产多种急需而当时靠进口的医用短寿命同位素。研制成功的有 $^{201}\text{Tl}$ 、 $^{67}\text{Ga}$ 、 $^{11}\text{C}$ 等。其中 $^{201}\text{Tl}$ 、 $^{67}\text{Ga}$ 药物的质量达到美国和国内的药典标准,获得批准可批量制备,逐渐提供国内需要。研制成超短寿命医用同位素碳-11,并已多次用于我所研制的正电子断层照相装置(PET)的动物试验,取得较好的显像效果。此外,还开展了正电子核素 $^{18}\text{F}$ 的制备研究。

1989年6月建成快中子治癌研究装置,同年通过国家鉴定验收。1991年11月开始快中子治癌临床研究。1992年4月通过了国家医药管理局和中国科学院组织的科技成果鉴定,获鉴定证书。“快中子治癌研究装置及应用研究”项目1993年获中国科学院科技进步奖二等奖、1995年获国家科技进步奖三等奖。1995年被列入国家攀登计划B的研究课题。“快中子治疗肺癌”1998年获军队科技进步奖三等奖。快中子治癌临床研究产生了极大的社会效益,在中子治癌研究工作中积累了中国自己的实践资料,培养了一批开展交叉学科研究的人才。至2002年,共治疗各种中子适应症癌症患者682人,其中包括一名台湾患者。

35 MeV质子束,提供核物理、核化学和材料辐照等的实验研究。北京原子能研究院、兰州近物所、本所等单位,用35 MeV质子束,进行了实验研究,并取得较满意的结果。中科院近代物理所利用BPL提供的稳定质子束,1996年在国际上首次合成

了超铀区缺中子同位素 $^{235}\text{Am}$ ,入选当年全国10项重大科技事件和全国十大新闻。

我进入高能所后,有幸参加35 MeV质子直线加速器部分工作,犹记得小夜班进行离子源阴极激活、凌晨开始750 kV加速管老练、推着示波器沿着磁铁电源长廊进行调束;夏天揪心空气湿度影响加速管老练速度、冬天留意楼顶冷却塔管道放水。我的工作开始旁边有老同事说着、看着到独立操作,后期在大家的培养、信任下,成长为BPL运行负责人,协调整个团队完成BPL运行、维护、改进任务。

#### 四、后35 MeV质子直线加速器

2002年下半年,所里根据学科定位,决定BPL暂停运行,尝试转变35 MeV质子直线加速器的运行模式,期望第三方介入,使BPL及快中子治癌的运行实现自持发展。转制没成功,BPL及其应用线相关设备就地封存。2003年3月,院里同意BPL退役。2005年高能所与中国工程物理研究院流体物理研究所签订BPL主体搬迁协议,并完成交付。

这之后,质子直线加速器迎来新的发展,加速器驱动的次临界系统(ADS)、散裂中子源(CSNS)项目中都需要质子直线加速器。这里值得一提的是:2018年8月,中国散裂中子源(CSNS)在东莞顺利通过国家验收,投入正式运行。CSNS加速器的布局:80 MeV直线+1.6 GeV RCS,比照“八七”工程目标,对于前辈的期盼,尚未完全实现。我从中深切地感受到,质子直线加速器乃至高能物理的发展,是与祖国的强大紧密相关。祝愿祖国繁荣昌盛,高能所稳步发展,早日实现中国高能物理人心中的愿景。