

日本的几个新的加速器计划

张 恩 厚

(中科院近代物理所)

摘要: 本文扼要介绍了四项日本的新加速器计划。它们是大阪大学的回旋加速器串接计划、筑波的JHP计划、NIRS的HIMAC计划和JAERI的离子辐照装置计划。

在出席1987年11月在东京召开的“第三届中日加速器及其应用讨论会”期间,概括地了解到,日本加速器建设在近些年里得到很快的发展。KEK的TRISTAN计划的最后一个加速器—正负电子对撞环,在86年11月投入运行。理化学研究所的RARF计划的主加速器SSC在86年12月开始出束。东京大学在完成NUMATRON的第一个试验环TARN的基础上,第二个试验环 TARN-II 将于89年建成。大阪大学在已有的AVF Cyclotron之后串接后加速装置的计划已经动工。由东京大学牵头,于87年4月提出了一个拟建于筑波的JHP计划。千叶国家辐射科学研究所已开始了一个专门用于辐射医疗的HIMAC计划。日本原子能研究所也开始了一个专门用于材料科学的离子辐照装置的建设计划。广岛大学正在设计一个叫做HISOR的1.5GeV的同步辐射装置。理化学研究所和日本原子能研究所合作,正在进行一个6GeV的叫做“大型放射光设施”(SOR)的同步辐射装置的设计。上述情况并不是对日本加速器情况的全面描述,但从中可以反映出日本的加速器建设正处于大发展时期。这些计

划,有的是为了基础研究的目的,有的是为了应用研究的目的,它们的完成将为日本的粒子物理和核物理基础研究创造先进的条件,同时也将为应用和开发研究提供优越的手段。我们对日本的已经和即将完成的计划了解得较多,而对新的计划了解得很少或还不了解。应本刊编辑部的要求,本文就四项新的计划做一简要介绍,其中两项是用于基础研究的,两项是用于应用和开发研究的。

一、大阪大学的 RCNP 回旋加速器串接计划

大阪大学 RCNP (Research Center for Nuclear Physics) 的主要设备之一, K = 140的AVF回旋加速器,自76年开始运转。在运转的第10个年头,即85年的年底,提出了一个大规模的扩建计划,叫做“RCNP/Cyclotron Cascade Project”。这项计划是在AVF回旋加速器之后串接一个分离扇回旋加速器(SSC)和一个多用途的束流环(MSR),此外还有三个实验厅,用于核物理、中子物理和辐射医学研究。图1是这项

核的基本情况,特别是在一些极限条件下的原子核的性质,如核反应和核衰变的新的模式提供了新的手段,也为重离子束的应用打开了新的前景。会议主席法国IN2P3核物理负责人在开幕词和闭幕词中都强调了这是一

个较新的领域,需要发展广泛的国际合作,特别强调了对中能区重离子碰撞应在法国Ganil,日本RIKEN,美国MSU及中国兰州之间加强合作,使这个领域内的研究取得更大进展。

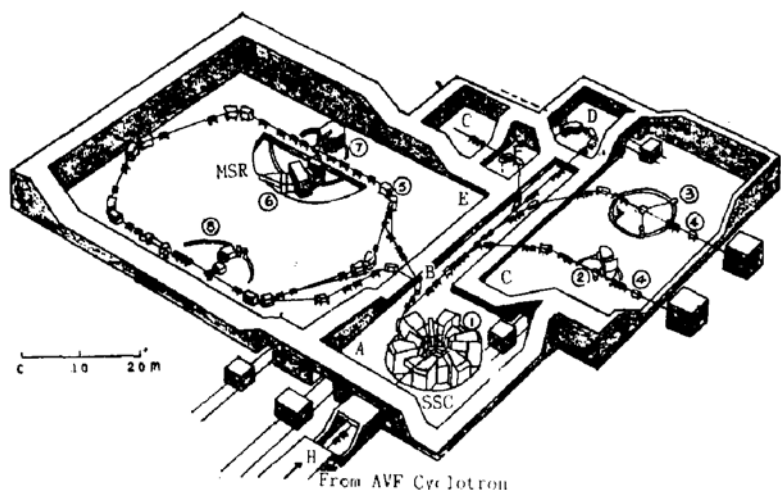


图1. RCNP串联计划总体布置

- | | |
|----------------|-----------------------|
| A. 分离扇回旋加速器 | 1. 分离扇回旋加速器 |
| B. 束流 | 2. π 介子谱仪 DUMAS |
| C. 实验厅1 | 3. TOF谱仪 |
| D. 用于中子测量的靶室 | 4. 普通应用中的靶台 |
| E. 实验厅2 | 5. 束流存储环 |
| F.G. 医学应用厅 | 6. 高分辨谱仪 BIG, RAIDEN. |
| H. 通往SSC的注入输入线 | 7. 大接收谱仪 |
| | 8. 反冲质量分离器CARP. |

表1 AVF与AVF+SSC的离子能量

	AVF (MeV)	AVF+SSC (MeV)
p	85	400
d	70	200
^3He	175	510
^4He	140	400
轻的重离子	$140 Q^2/A$	$400 Q^2/A$

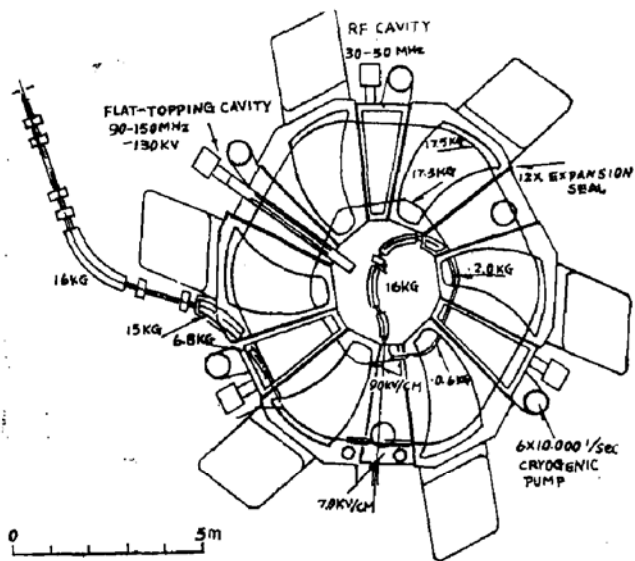


图2. SSC的平面示意图

计划的总体布置, 表1是用AVF和AVF+SSC加速的几种束流能量的对比。这项计划得到日本物理协会和日本科学委员会的支持, 并于86年8月由文部省批准。土建工程已自87年秋动工, SSC大厅将于88年内竣工。

SSC主要由6扇分离螺旋扇磁铁、3个高频加速腔和1个“平顶”腔(Flat-topping Cavity)组成, 图2示出了它的平面示意图。据了解, 这台加速器的基本设计已经完成, 生产设计正在进行, 计划1991年5月可能开始调束。

SSC磁铁铁芯一共由12块低碳钢锻件组成, 磁轭的

含碳量~0.02%, 极面的含碳量~0.005%。磁轭截面积与极根截面积之比是1.14, 极芯侧面呈Rogowski曲线。主要设计参数列于表2, 参数的决定考虑了这样三点: ①注入

表2 SSC磁铁设计参数

磁铁扇数	6	最高磁场	17.5KG
角	$22^\circ-27.5^\circ$	最大安匝	$1.4 \times 10^5 \text{AT}$
气隙	60mm	最大电流	950A
磁铁高	526mm	最大功率	440KW
磁铁长	550mm	垫补线圈数	36对 \times 6
总重	2100T	最大电流	500A
注入半径	200cm	垫补功率	350KW
引出半径	400cm		

半径取为200cm, 是因为已有的AVF回旋加速器(引出半径100cm)做注入器, 并希望把质子加速到400MeV。②对不同离子和不同能量的垂直Betatron振荡频率大于1。③为减小磁铁重量, 最高磁场要达17.5KG, 而且气隙取60mm。

SSC高频系统的加速腔和“平顶”腔, 都已做过1/5模型实验。“平顶”腔频段是加速

表 3 SSC 高频腔设计参数

	加速腔	“平顶”腔
RF频率	30—52MHZ	90—156 MHZ
腔数	3	1
RF峰压	500KV	170KV
电压稳定	10^{-4}	10^{-3}
RF功率/腔	250KW	30 KW
腔型	单隙	单隙
调谐	旋转板	短路板
束孔径	30mm	30mm
加速间隙	200—300mm	50mm

腔的3倍。配置“平顶”腔可扩展束流相宽接收度，从而可获得好于 10^{-4} 的能散。设计参数列于表3。在设计过程中，做了这样一些考虑：①相应于使用的谐波数6和10，3个加速腔电压必须同相和三相工作；为获得 10^{-4} 能散，各腔（加速腔和“平顶”腔）高频相位的稳定性应该好于 0.1° 。②对加速400MeV质子，SSC引出半径处的圈间距应达到5mm，这时每圈能量增益应达到 $\sim 1.5\text{MeV}$ 以上；“平顶”腔电压大致取加速腔电压的10%。③考虑到引出束能散正比于引出处电压与注入处电压之比，腔体电压应沿径向上升。④两扇磁铁之间，只有 $\sim 18^\circ$ 方位空间可以安置腔体。⑤单隙型加速腔对任何次加速谐波都具有高的加速效率，而且渡越时间效应也不严重。

多用途贮存环 MSR (Multipurpose Storage Ring) 呈六边形，周长约150m，可以工作于三种模式：①用于高分辨实验的冷却模式 (Cooling mode)；②用于高亮度实验的积累模式 (Accumulation mode)；③用于获得更高能量的加速模式 (Acceleration mode)。全环共有12个二极磁铁和24个四极磁铁。在两个长直段上放置了电子冷却系统、RF加速系统、高分辨摄谱仪BIG-RAIDEN及其他实验设备。MSR的功能将分步实现。第一步先实现无轨道控制的循环环(未装四极磁铁)，能够回旋磁刚度3.2 TM的束流，可回旋数百圈。然后，再逐步装配电子

冷却系统(220MeV)和同步加速系统。电子冷却系统是把几百MeV的质子或 $\sim 50\text{MeV}/N$ 的轻的重离子束制备成甚高品质束流的关键，也是提高束流亮度的关键。因而电子冷却对进行甚高精度核物理研究和原子物理研究是极为重要的。同步加速系统可以进一步提高束流能量，能把质子加速到1.6GeV，能把 $Z/A = 0.5$ 的离子加速到0.5GeV。加速质子时，回旋频率从 $\sim 1\text{MHz}$ 增加到2.2MHz。加速离子时，回旋频率从 $\sim 0.7\text{MHz}$ 增加到1.8MHz。需要的加速电压大约是4hkV，这里h是谐波数。

二、筑波的JHF计划

根据日本核物理协会的建议，成立了一个由东京大学核研究所(INS)牵头的专家工作组，共同制定一个有特殊要求的加速器方案。来自INS、KEK和其他研究机构的专家们，经过近一年的工作，于87年4月，提出了一个叫JHF(Japanese Hadron Facility)的计划。这项计划得到了广泛的支持，在进一步征求意见后即提交政府，促使自89年在筑波开始实施。

JHF计划如图3所示，它的主要部份有四台加速器：①质子Linac，②重离子Linac，③质子Synchrotron(Ring 1—A)，④Stretcher/Synchrotron (Ring 1—B)。此外，JHF建址比邻于KEK的南部，JHF的质子Linac还计划成为KEK的12GeV质子Synchrotron的一个强大的注入器，并拟在12GeV PS之上增建一个Strecher。共有五个实验区：①低能奇异核(Exotic nuclei)实验区，②高能奇异核实验区，③中子实验区，④介子(Meson)实验区，⑤K-介子(Kaon)实验区。这项计划的主要目的是用于研究物质的尚未探索的方面，拓广核物理、中子物理、粒子物理以及固体物理等。五个实验区各具特殊意义，将为科学家提供走向新的科学领域的舞台，并吸引更年青的一代进入这些新领

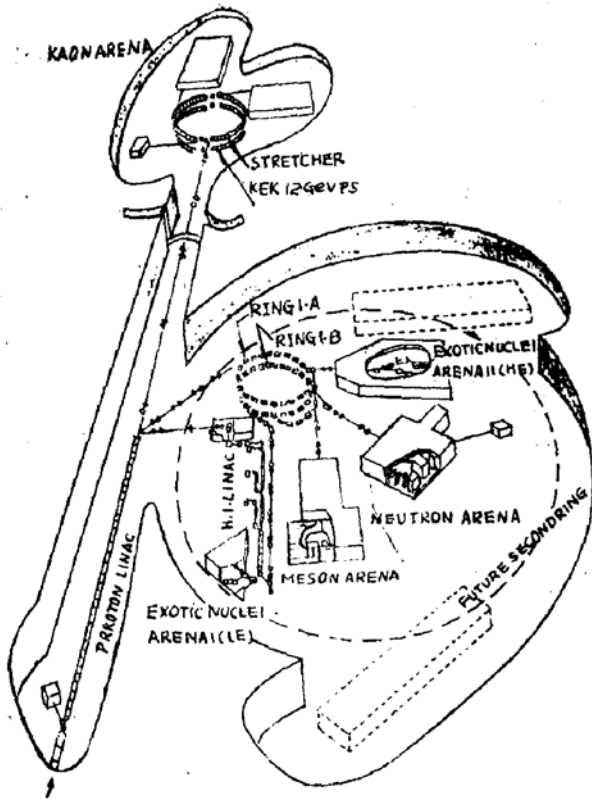


图3. JHF概貌

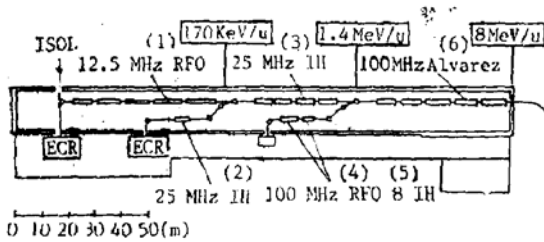


图4. 重离子Linac

域。

质子Linac包括一个离子源(H^-)，一个RFQ段，一个Drift-Tube段和一个Coupled-Cell段，总长600m。质子束峰10mA，束宽 $400\mu S$ ；重复频率50HZ，终能1GeV。主要有三个作用：①为Ring1-A做注入器，②为KEK的12GeV RS做注入器，③为ISOL源(Isotope-Separator-On-Line Source)提供高强度质子束。

重离子Linac可把各种离子(从氢到铀)加速到8MeV/N。加速不稳定核是其特色。总长180m，由三段组成：RFQ段、IH段和Alvarez段，如图4所示。在IH段和Alvarez段之间配置电荷剥离器，以提高其后的加速效率。配有两种离子源：ECR源和ISOL源。

ECR源是常规的，提供稳定核的离子束。 $ISOL$ 源是特殊的，提供不稳定核的离子束——用质子Linac提供的高强度质子束轰击钽靶，引起核反应，产生各种不稳定核，将不稳定核电离后加速到60keV，经分离即得到所希望的离子。

Ring1-A是快循环Synchrotron，平均直径54m。可把从质子Linac注入的1GeV的质子束加速到2GeV，加速频率3.3MHZ，重复频率50HZ，平均流强 $200\mu A$ ，每脉冲离子数 2.5×10^{13} ppp。当环内的两台聚束装置投入工作后，可将质子束流的脉冲宽度聚缩到 $\sim 200ns$ ，输送到中子实验区和介子实验区。以满足产生脉冲中子和脉冲 μ 介子的需要，Ring1-A还可将质子束传输给Ring1-B，这时，后者工作于Stretcher模式，能把脉冲质子束展宽成连续质子束，以满足某些核物理实验的需要，也是GeV- π 介子工作的需要。

Ring1-B是加速重离子的慢循环Synchrotron，直径与Ring1-A相同，位于Ring1-A之下。除做为Ring1-A之后的Stretcher使用之外，主要用于加速从质子到铀的重离子。共有三条加速链：①质子Linac + Ring1-A + Ring1-B，②ECR源 + HI Linac + Ring1-B，③质子Linac + ISOL源 + HI Linac + Ring1-B。可以把质子加速到3.2GeV，把 $Q/A = 0.5$ 的离子加速到1.3GeV/N，把铀离子($Q = 69$)加速到0.56GeV/N(0.1PnA)。

三、NIRS的HIMAC计划

在千叶(Chiba)的国家辐射科学研究所(NIRS)提出了一个专门用于医学研究的HIMAC计划(Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba)。这项计划包括一个Linac注入器，两个Synchrotron环和一个束流分配系统。有四个用于医疗的辐照室，其中两个室安装了垂直和水平束流管道。另有四个用于辐射医学、辐射生物学和其他有关课题的实验室。

图5给出了HIMAC的概貌。这项计划的基本要求有二：①为实现重离子束在人体内穿透30cm的深度，束流能量应达到300MeV/N以上；②为实现重离子束能复盖较大的治疗面积，辐照场的直径应达到22cm。表4给出了HIMAC设计的主要要求。这项计划的一部份已由政府批准，并且注入器的建设在87财政年度开始实施。癌症治疗的预备试验计划于92年开始，临床试验计划于93年开始。

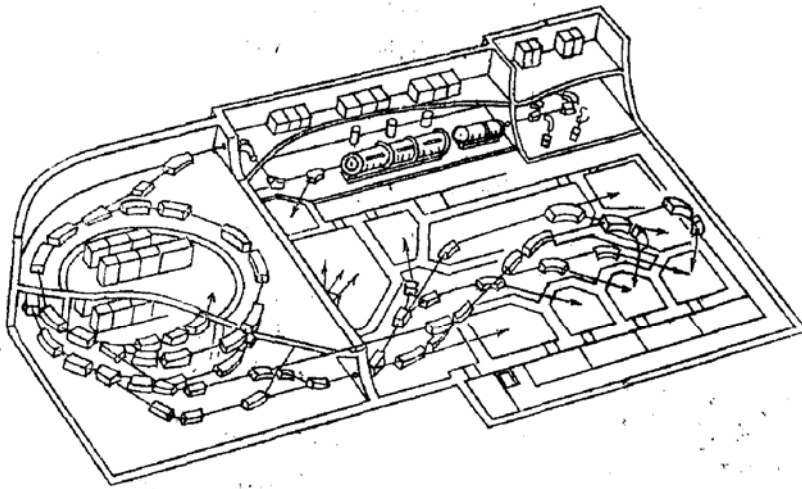


图5. HIMAC概貌

表4 HIMAC的设计要求

离子种类	${}^4\text{He}-{}^{40}\text{Ar}$
最大能量	800MeV/N ($q/A=1/2$)
最小能量	100MeV/N ($q/A=1/2$)
每环强度	$10^{10}-10^7$ PPS (He—Ar)
束流宽度	400mS
重复频率	1/2HZ
束发散	$10\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$
束能散	$\pm 0.2\%$
辐照场	$\phi 22\text{cm}$
剂量均匀度	$\pm 2\%$ (全场范围)
剂量率	500rad/min

HIMAC采用两种离子源：PIG源主要用于产生轻的离子，ECR源可以增加HIMAC加速重离子的能力。两种离子源一起可以产生从He到Ar的各种离子， C^{2+} 、 Ne^{3+} 和 Si^{4+} 的流强依次为 $160\mu\text{A}$ 、 $58\mu\text{A}$ 和 $13\mu\text{A}$ 。

注入系统包括RFQ Linac和Alvarez Linac,输出能量分别为0.8和6MeV/N。能

加速荷质比大于1/7的重离子。为产生足够的聚焦，运转频率选为100MHZ。加速的最大重复频率和RF负载因子各为3HZ和0.3%。RFQ Linac是东京大学发展起来的TALL的仿制，是四翼(Vane)型的，翼长和腔直径各为7m和0.6m。峰值RF功率为300KW,翼头的最大表面场为 $\sim 200\text{KV}/\text{cm}$ 。横向接收度为 $0.6\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$,传输效率为 $\sim 90\%$ 。Alvarez Linac有三个腔,总长24m。直径大约2m。每个腔馈送功率1MW,各腔轴向场强是1.8,2.2和2.2MV/m。在漂移管上配备着按FFDD聚焦序列排列的脉冲四极磁铁，在最强场梯度 $6.8\text{KG}/\text{cm}$ 下传输接收度是 $5.8\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 。在Alvarez Linac之后装有厚 $100\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 的电荷剥离器。

HIMAC有两个Synchrotron环，安装于上下楼层。两个环有灵活的运行模式：各环可单独运转，两环可串接运转，一环可做贮存环。环的直

径41m，全环磁元件采用FODO聚焦序列，共有二极磁铁12个，四极磁铁24个，直线段12个。磁铁最大磁刚度 9.75TM ，水平和垂直接收度分别为30和 $3\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 。为校正闭合轨道畸变，环上设计了一套校正磁铁和束流位置诊断器。有两个 $\lambda/4$ 加速腔，工作频段为1.0—7.5MHZ，能产生6KV电压，输入功率为15KW/腔。从加速全剥离离子考虑，真空室气压应达到 10^{-8} 托量级。真空室可烘烤到 200°C ，全部采用标准金属密封。

根据使用要求，设计了较复杂的两层束流分配系统，可把重离子束输送到4个治疗室和4个实验室，束流在靶上的位置偏差只允许2.5mm。4个治疗室分别由下层束流管道输送水平离子束，其中有两个治疗室可由上层束流管道输送垂直离子束。同一治疗室的垂直束和水平束可由上下两个Synchrotron环同时供给。4个实验室可由或上或下的

Synchrotron环供束。

四、JAERI的离子辐照装置计划

装置计划

日本原子能研究所(Japan Atomic Energy Research Institute)的高崎研究所正在实施一项离子辐照装置计划。这项计划主要包括四台中、小型加速器：一台 AVF Cyclotron(K=110)，一台3MV的Tandem，一台3MV的Van de Graff和一台400KV的离子注入机。这些加速器在日本虽然都已成为商品，然而，让它们提供特殊性能的束流，并且让它们联合供束，这就显出这项计划的特色了。整个计划分两期进行，到90年底建成 AVF Cyclotron和Tandem，然后再用2年时间建立Van de Graff和离子注入机。图6

是AVF Cyclotron平面布置。

离子束辐照的内容主要有：空间环境材料研究，核聚变堆材料研究，新功能材料研究以及生物工程的相关研究。开展这些方面的研究，要求加速多种离子，有宽的能量范围，有适当的束流强度。针对不同的研究课题，应产生各种特性的束流，如展宽束、脉冲束、微米束、二重或三重联合束以及二次中子束等。例如，均匀度 $\pm 10\%$ 的高能质子展宽束可用来评估用于空间环境的太阳能电池的耐辐照性能；高能脉冲离子束可用于引起化学反应的辐照过程的实时观测；十几MeV的重离子微米束可用于研究记忆单元和大规模集成电路；几MeV的轻离子微米束可用于进行离子束分析；用双重束交替注入进行材料分析是离子束分析的新尝试；用质子束和电子束同时辐照可模拟空间环境；用三重

联合束(几KeV—几MeV的P、He和重离子束)可模拟核聚变堆的情况。表5列出了所要求的束流特性。

迄今为止 Cyclotron 主要用于核物理基础研究、医用同位素生产和辐照治疗，JAERI的 Cyclotron 在日本是第一个主要用于材料科学研究的。这台 K=110的 AVF Cyclotron 是住友公司产品，有4对扇块，2个加速电极，引出半径为0.923m。用两种外部轴向注入离子源：ECR源用于重离子，双等离子体源用于轻离子。共有8个水平束流管道，其中4个用于轻离子，4个用于重离子。还有由4个水平管道弯下去的垂直管道。

另外3台小型加速器与Cyclotron并列安置，它们的束流管道的布局考虑到可

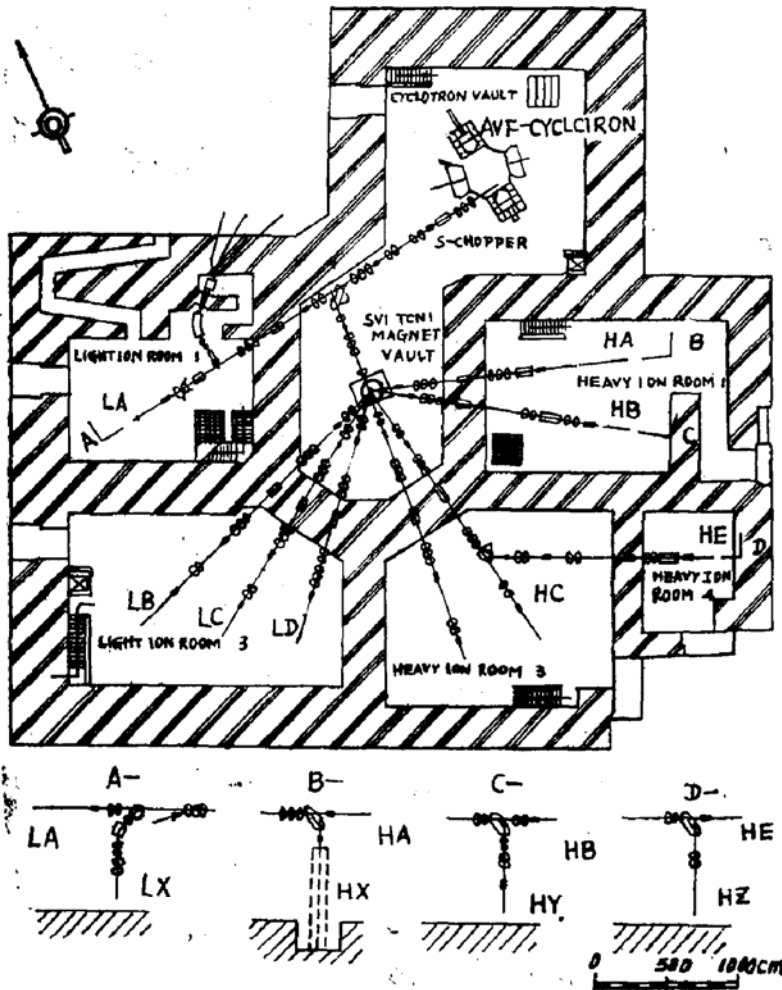


图6. AVF Cyclotron平面布置

表 5

所要求的束流特性

束流	加速器	离子	能量	束流特性
微米束	T	He, C, Ne, Fe,	5—15MeV	束范围 $\leq 2\mu\text{m}$ 束强度 \geq 数10pA
	V	LI	1—3MeV	束范围 $\leq 1\mu\text{m}$ 束强度 $\geq 1\text{nA}$
	C	HI	30—数百MeV	束范围 $\leq 10\mu\text{m}$
展宽束	C	P	5—50MeV	场大小 $\leq 100 \times 100\text{mm}$
		HI	$\geq 300\text{MeV}$	场大小 $\leq 50 \times 50\text{mm}$
脉冲束	C	LI	展宽范围	脉冲宽 数ns
		HI		间歇 100 ns-1s
多重束	T+V+I	HI+P+He	\leq 几MeV	三重束 辐照
	T+I	LI+HI	1~3MeV	二重束
	V+I	LI+HI	1~3MeV	二重束 微米束(V)
	C+T	O, Cl+HI	$\leq 100\text{MeV}$ (C)	二重束
	T+V	P+e ⁻	\leq 几MeV	二重束 辐照
中子束	C	d (\rightarrow Be)	10~50MeV	流强 $\leq 10^{17}\text{cm}^{-2}$ 场大小 20×20mm

(C: AVF Cyclotron, T: Tandem, HI: Heavy Ions
I: Ion Planter, V: Van de Graff, LI: Light Ions)

以向几个实验终端提供多重束的要求。各台加速器可单独运行提供脉冲束、展宽束、微米

束和中子束等，也可2台或3台加速器同时运行提供二重或三重联合束。

上接22页

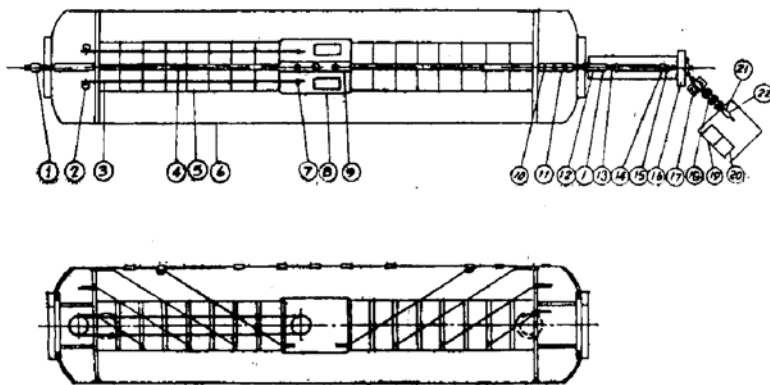


图 2

造，以减少SF₆在传输过程中产生的损失。

整个加速器将实现计算机控制，各种控制和监测过程都将通过CAMAC数据获取系统和光纤数据遥测系统来完成。

这台5MV串列静电加速器计划于1988年

底到1989年秋天关闭进行改进和提高。新建成的8UDH将于1989年底投入运用。

8UDH串列静电加速器将在核科学的低能边缘区域、核科学与天体物理学之间的接合领域、原子物理学方面、粒子物理方面、材料科学及应用研究等方面开展

广泛的研究。同时，它在培养原子核物理及其有关学科的研究生、大学生方面也将是一台性能优良的设备。