

自然科学学科发展战略研究报告之三:核技术

Strategic Research on Natural Science Disciplines:Nuclear Technique

国家自然科学基金委员会

编者按 国家自然科学基金委员会为正确使用自然科学基金提供依据,近年来邀请有关科学家、情报专家、科技管理专家组成了50多个学科发展战略研究组,对各学科的发展战略提出了研究报告。这些研究报告,对引导我国科技事业的顺利发展有着重要意义;特别是对一个时期内自然科学基金的资助重点领域和方向将起一定的指导作用,对国内的学科建设、学术规划、科技人员培养也将起引导和咨询作用。为此,商得自然科学基金委员会同意,本刊将陆续刊登各学科战略研究报告的主要论点。一方面分析介绍各学科国内外发展现状和趋势,以及我国的优势、劣势、制约因素等情况,另一方面供申请自然科学基金资助者参考。

提要: 本文简述了核技术在国民经济和科学研究中的地位 and 作用,重点分析了辐射工艺和辐射加工、核成像技术、核辐射工业检测仪表、核分析技术、放射性药物、离子束加工、小型低能加速器、同步辐射和核技术在农业中的应用等方面的研究现状和发展重点;提出了发展我国核技术及其推广应用的目标和建议。

一、战略地位

核技术是现代科学技术的重要组成部分,是当代最主要的尖端技术之一,也是社会现代化的标志之一。

1896年贝克勒耳(A. H. Becquerel)发现了铀的天然放射性。随后,人工放射性的发现,原子核模型的建立,加速器和原子反应堆成功运转以及第一颗原子弹的试爆成功,使原子核科学技术不仅作为一门基础科学迅速向前发展,而且形成为一门当代最重要的技术科学之一——核技术,对世界政治、经济产生了人们预料不到的巨大的影响。第二次世界大战以后核技术开始大规模地应用到国民经济中。经过60年代的技术开发和试验推广,到70年代,核技术在很多方面形成了新兴的产业部门,在发达国家中核技术的应用已经普及到国民经济各个有关领域。进入80年代后,核技术应用由于得到微电子学、计算机,以及各种新型仪器设备的支持而出现了新的发展高潮,其应用

领域日益拓宽,发挥的作用也越来越大。

核技术经过几十年的发展,取得了日益明显的经济效益。据不完全统计,1960~1985年全世界同位素和辐射技术工业应用的累积经济效益约为800亿美元,其平均经济效益系数为5.9。早在60年代,国际上技术先进的国家推广应用核技术所取得的经济效益即已构成国民经济总收入的0.1~0.3%。到了80年代已达到0.5%。

核技术向各行业的渗透,促进了传统行业的技术改造并加速了新技术革命的进程。同位素工业测量仪表、核测井以及核无损探测技术等对资源的勘探和开采、生产过程自动控制、产品的质量、降低能源和资源消耗等均有重要作用。近年来,核技术在医学方面的应用也同样引入瞩目,它已经拯救了成千上万人的生命。以美国为例,核医学已遍及各大医院(美国政府规定设有200张及以上病床的医院没有核医疗设施是不准许开业的),每两个就诊者就有一人要求助于核医学。目前核技术是早期诊断冠心病和某些癌症的重要手段,核技术还可用来为社会服务,例如,预报自然灾

害,环境污染监测,污水、污泥和废气处理,辐射消毒和刑事案件侦破等。

核技术的应用,使人们的视野从宏观推向微观,从而使人们有可能从分子水平(甚至原子水平、原子核水平)动态地观察自然现象。例如有关物质的微观结构及超微量成分,以及生命科学中细胞水平和分子水平的生物学行为信息,目前都可以或只能通过核技术灵敏而精确地加以测定。核技术为自然科学各学科的发展提供了多种实验手段。同位素示踪技术、正电子发射断层显象技术(PET)和核分析技术等应用于生命科学,离子束加工和辐射加工技术用来进行材料改性,有可能导致生物医学和材料科学的突破性进展。现代很多科学技术成就的取得都是与核技术的发展分不开的。核天文学、核考古学、核地质学都是从核技术应用而产生的重要的边缘学科。

显然,核技术对社会、经济 and 科学的发展能起到非常重要的作用,它所具有的先进科学技术的价值,在现代社会中应具有的战略地位是不言而喻的。

我国核技术的发展,经历了与世界核技术发展相类似的过程。50年代中期到60年代是开创时期,主要侧重于国防军工。60年代进入了应用研究时期,核技术研究全面铺开,已扩展到科学研究、医学、农业、工业等各个领域。到了80年代,我国核技术进入了以工业为重点的开发时期。然而就总体而言,我国核技术的发展尚处在形成阶段,相当于工业发达国家60~70年代的水平。具体表现在我国核技术的大量研究成果仍然徘徊在中试或小规模生产范围,经济效益尚未达到应有的水平。这种落后状态不仅直接影响核技术本身的发展,而且还会妨碍其他技术科学,例如,新材料、微电子学、生物工程、能源资源、环境科学等的同步发展。

核技术的范围是十分广泛的,它包括核武器、核动力、同位素和辐射技术。本文主要论述同位素和辐射技术,它涉及辐射加工、离子束加工、核分析技术、核成像技术、辐射探测仪表、放射性药物和标记化合物、同位素示踪技术、加速器技术、反应堆技术、核辐射探测器 and 电子学、辐射源技术、辐射剂量学和辐射防护,等等。其中核分析技术、同步辐射、辐射工艺研究和辐射加工、放射性药物、离子束加工、核成像技术,小型低能加速器,核辐射工业检测仪表和核技术在农业中的应用是当前十分活跃的研究领域,也是我国2000年前的重点发展领域。

二、发展重点

1、核分析技术

核分析技术包括超精细相互作用核分析技术、离子束分析技术和活化分析技术。超精细相互作用核分析技术是近二十多年来逐渐发展起来的一门新兴技术,它既能提供原子核以及它周围邻近原子的信息,又能提供宏观的平均信息。这些信息是很难或甚至不可能用传统的方法获得的。今后研究的重点将是发展新的更有效的分析技术。离子束分析技术(IBA)始于60年代末,它具有绝对定量、无损和简便直观等优点,已成为一门元素组分、结构与表面界面等分析的专门技术。其前沿是超微量和清洁表面的分析技术,例如加速器超灵敏质谱技术和超高真空离子束分析;微束和显微技术,包括扫描质子微探针(SPM)、扫描透射离子显微术和扫描隧道显微术(STM)等。活化分析是最早建立起来的核分析技术,发展至今已有40年的历史,方法本身尽管已趋成熟,但在应用领域里仍和以前一样充满活力。当前重点发展领域有分子活化分析、体内活化分析、超短寿命核素活化和冷中子活化技术等。核分析技术的主要应用领域是材料科学和生命科学。研究的重点集中在超晶格材料、高温超导材料、天然金刚石、生物大分子结构和功能以及微量元素等。

鉴于核分析技术在材料科学和生命科学中的重要作用,美国已成立了以离子束分析为主要手段的国家材料中心。在最近日本制定的“人类生命科学前沿研究计划”中把离子束分析,特别是微束技术列为必须发展的重要支撑技术。

2、同步辐射

同步辐射(SR)是由高能电子同步加速器或储存环提供的一种强光源,近十几年来,同步辐射应用在原子分子物理、表面物理、生命科学、化学以及材料科学中已取得了重要的成就,促进了多种科学的发展和工业技术的进步,并展现了巨大的发展前景。我国合肥同步辐射国家实验室和北京电子储存环的建立,必将有力地推动我国同步辐射研究和应用。

3、辐射工艺研究和辐射加工

辐射加工就是利用电离辐射与物质相互作用的物理、化学和生物效应,对物质或材料进行加工处理。辐射加工是一种高效加工手段,具有穿透性强、可在常温下进行、节能、无残毒和废物,以及易于控制等独特的优点,已经产生了重大的经济效益和社会效益。在传统行业的技术改造、高科技产业形成、功能材料高性能化、新材料开发、实现微细加工及三废处理中都具有重要作用。

辐射加工从50年代开始,经过三十多年的发展,到80年代末,全世界辐射加工的年总产值已接近国民经济总产值的1%左右;拥有的 ^{60}Co 源的强度已达 10^8 居里;用于辐射加工的电子加速器总

功率已达15 000千瓦以上,并以每年10~15%的速度递增。我国在50年代就开始辐射学研究,并试制了少量产品,但到80年代末辐射加工的总产值仅约2 000万元,在大多数领域内的研究和应用水平和国际差距很大。因此重视和加强对辐射加工研究和应用的支持是十分必要的。为此建议:在世界上已经形成产业,但在我国尚处于研究或中试阶段的项目,如医疗用品消毒、电线电缆辐射交联、热收缩材料制备、涂层固化和表面改性、生物敷料消毒、特种高分子材料的辐射聚合、渗析膜的制备等,尽快形成生产能力;对世界上尚处于中试或半工业化水平,还未形成商业规模的项目,如食品辐照保鲜、烟气辐照脱硫脱硝,做好技术信息储备;在世界上尚处研究和发展阶段的项目,如天然高分子辐射降解、橡胶硫化、生物活性物质的固定、生物相容高聚物和异型塑料制品的敏化辐射交联等,做好技术跟踪。为了加速辐射加工高技术产业的形成,辐射源是关键的一环。要以辐射源技术为突破口,进一步提高 ^{60}Co 源的射线利用率;生产稳定性高、持续运行时间长、功率20~100千瓦的电子加速器,并研制高于150千瓦的加速器。

4. 放射性药物

放射性药物是用于诊断或治疗的放射性核素制剂或其标记药物。它不但是探索人体生命过程的唯一的活体代谢试验材料,是其他方法不能取代的;又是现代医学诊断和治疗危害人类最为严重的疾病(冠心病、癌症、脑血管病、爱滋病等)的必不可少的工具,有极其重要而广阔的发展前途。目前反应堆生产的 ^{99}Tc 及其化合物仍然是最主要的放射性药物。但由于加速器生产的贫中子核素 ^{67}Ga 、 ^{111}In 等良好的射线性质和亲肿瘤特性以及 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 和 ^{18}F 等发射正电子的生命元素应用于活体代谢研究,使得加速器生产的放射性药物得到迅速发展,并成为放射性药物的前沿领域。除此以外放射性药物已包括从无机化合物直到生物大分子等各种类型,其剂型也涉及现代药物的大部分剂型。目前放射性药物发展前沿是单光子断层显象和正电子断层显象的显象药物。重点发展领域是功能显象药、代谢显象药、受体显象药、免疫显象药和免疫治疗药。30年来,我国的放射性药物科研和生产,从无到有,取得了多项科研和开发成果,并正在形成产业体系。反应堆生产的放射性药物已基本上适应当前国内市场的需要。加速器制备的贫中子放射性药物的重要品种也已研制成功,部分药物有小批量生产供应市场,但与国内需求相距甚远。国内虽有正电子放射性药物的前期科研工作,但尚未开展包括实际临床应用在内的研究工作。国务院已把放射性药物列为重点支持的产品。为使我国放射性药物达到

国际先进水平,并形成独立的研究和生产基地,建议建立2~3个贫中子核素药物生产基地和1~2个正电子核素药物和活体代谢研究中心,努力提高现有放射性药物的产量和质量,切实开展新药研究,重点是贫中子核素放射性药物、正电子断层显象药、单光子断层显象药、免疫导向和代谢导向药物等。

5. 离子束加工

离子束加工是用离子束改变固体表面层性质的研究,是一个非常活跃的新领域,已经形成了离子注入冶金学这样一个新的交叉学科。在70年代,离子注入已被确认为是微电子线路加工的手段之一,并获得了广泛的商业应用。进入80年代以后,超大规模集成线路也是依赖离子注入技术发展起来的。目前离子束加工的研究重点是:

(1) 绝缘体的离子注入,这里包括绝缘光学材料改性,陶瓷材料改性。

(2) 聚合物的离子注入,特别值得一提的是离子注入制备高分子导电材料。中国科学院上海原子核研究所已利用离子注入技术制成了我国第一个具有半导体特性的聚乙炔膜,性能在世界上处于先进行列。聚合物的离子注入研究有可能为包括微电子工业、聚合物工业等在内的工业发展带来突破性进展。

(3) 高能离子轰击。根据快速离子对生物大分子的解吸现象,制成的质谱装置不但灵敏度高,还可以把生物大分子完整地解吸。这种很有特色的新技术,无疑在生命科学研究方面将会发挥重要作用。高能离子注入将可以提高半导体器件的性能和扩展器件的新品种,并可望在不久的将来获得商业上的应用。

(4) 高温超导材料的离子注入。

(5) 离子束成膜技术。这包括荷能离子束成膜和离子化集团束(ICB)成膜技术。

6. 核成象技术

核成象技术是核物理科学与现代图象理论相结合的边缘学科。核成象技术主要包括X射线断层扫描(XCT)、核磁共振CT(NMR-CT)、正电子发射CT(PET)、单光子发射CT(SPECT)、康普顿散射CT(CST)以及穆斯堡尔效应CT等。主要应用领域是生物医学研究和临床诊断,以及工业产品的无损探测和生产过程自动控制。核成象技术发展非常迅速。1972年英国EMI公司制成第一台医用XCT,即头颅XCT,发明者豪斯菲尔德(Hausfield)与在图象理论中有杰出贡献的科马克(Cohmark)因此分享了1979年度的诺贝尔医学奖。随之,1974年第一台PET问世,1977年NMR-CT研制成功。医用核成象技术在生命科学的基础研究,癌症和心血管疾病的早期诊断方面做出了巨大的

贡献。美国把PET列为当代高科技世界九大明星的榜首。工业CT有XCT, CST和穆斯堡尔CT等, 它对被测物体的无损探测速度快、空间分辨率和密度分辨率高, 而且在许多应用场合中是常规的X射线成象和超声探伤等方法所不能取代的。工业CT的真正实际应用, 距今不过十年左右, 而其具有显著经济意义的大规模应用, 则正初露端倪。目前国际上工业CT最为集中的应用领域可说是国防工业, 如直径为2米火箭的整体测试, 以及各种枪炮和弹药的无损检测等; 还被应用于飞机螺旋桨、发动机、汽轮机叶片、汽缸等的无损检测。工业CT的应用已深入到生产过程的在线实时检测和自动控制领域。如美国IDM公司研制成功的“钢管全长探测系统(IPIS)”的工业CT, 据最保守的估计, 一个日产20 000吨无缝钢管的工厂在一年时间内可收回设备投资, 经济效益十分显著。我国目前已进口了200台医用XCT, 7台NMR-CT。但是医用CT的研制还十分落后, 工业CT无论在研制或实际使用方面均属空白。在核成象技术领域中, 我们建议在2000年前应达到的目标是: 建成我国自己的医用XCT工业; 对已研制成功的NMR-CT和PET样机作进一步的完善和提高, 形成产品; 建立第一台通用型工业CT并向在线检测大型工业CT发展; 开展穆斯堡尔CT和强束流传输的X射线聚焦器(或称X光透镜)的研究, 追踪国际先进实验室的动态。

7、小型低能加速器

小型低能加速器是核技术最重要的支撑技术之一。加速器诞生之初, 主要用作核物理基础研究。50年代初, 低能加速器向国民经济领域大规模转移。60年代初, 开始了离子注入半导体的工业应用。60年代中期以后, 加速器在核医学、辐射加工、离子注入以及核分析技术等方面得到了广泛的应用, 取得了惊人的发展, 导致了70年代小型低能加速器的迅速发展, 形成了一个专门的产业——加速器工业。据不完全统计, 全世界小型低能加速器到80年代中期已增加到约7 500台。美国在70年代拥有的加速器占世界加速器总拥有量的三分之二, 年产值达20亿美元。当今加速器在高技术、新技术相关的许多边缘学科中, 特别在高技术产业的形成中起着十分重要的作用。我国的加速器从50年代初开始建立, 50年代后期开始加速器的研制及其应用研究工作。我国现有各类小型低能加速器共338台, 其中离子注入机164台。50~80年代, 经过30年的努力, 国内加速器的研制和应用已取得一批可喜的成果; 建立了一批科研院所和生产厂家, 并能开始小批量生产; 有了一支相当强的专业技术队伍, 为进一步发展加速器事业和形成产业奠定了基础。从总体来看, 小型低能加速器今后要进一步向“高、新”的方向发展。“高”是高功率、高

寿命、高可靠性; “新”是新品种、新技术、新材料和新工艺。小型低能加速器要着重发展大功率辐射加工用电子加速器、医用回旋加速器和高能离子注入机, 同时应该建立起我国的加速器产业, 摆脱在应用领域里依赖进口的不正常局面。

8、核辐射工业检测仪表

核辐射工业检测仪表(以下简称工业核仪表), 具有投资少、见效快、效益高等优点。工业核仪表对于传统工业现代化, 加速技术改造方面具有重要作用, 因此世界各国都十分重视它的发展。在过去的25年中, 全世界工业核仪表的总数增长了100倍。我国从50年代中期便开始工业核仪表的研制。据1988年统计, 我国已有工业核仪表6 000台。从产品的数量、品种和质量来看, 基本上相当于美国60年代的水平。在目前阶段, 应该优先发展那些经济效益显著, 对改造目前工业生产有明显作用的项目, 如多参数纸张测厚仪, 在线水泥生料配料系统、热轧钢板和钢管在线 γ 测厚仪、 γ 料位计、密度和水分测量仪、火灾报警和消防系统、镀层测厚仪、核子测井设备、 γ 射线探伤仪、核秤、电子俘获 γ 射线元素在线分析仪等等。我们要根据未来的工业发展趋势, 跟踪国际发展新技术, 重点研究: 煤粉质量流量计和在线灰分分析仪、 ^{252}Cf 中子源应用、X射线荧光扫描分析仪、室温下工作的能量色散X射线分析仪等。

9、核技术在农业中的应用

核技术在农业上带来的经济效益是非常巨大的。这里仅叙述辐射育种和农用新型生长素。辐射育种在国内外已进行多年, 我国的辐射育种技术在国际上处于先进地位, 已培育出“鲁棉一号”等各种作物的优良品种。在辐射育种领域中, 辐照源已从传统的 γ 源发展到快中子、离子束(包括重离子)、激光等离子体等。经典的单一 γ 辐照技术已经转向多种辐射联合使用。人们有理由期望辐射育种从“随机型”走向“定向型”。作为农作物、养殖业和畜牧业中使用的新型生长素(微量元素肥料和饲料)具有重大的科学意义和实用价值, 是当前国际上正在逐渐推广, 并已在我国初步应用的一项新的增产技术。农作物生长环境的微量元素背景值, 微量元素在作物中的分布、吸收、蓄积、迁移等新陈代谢规律, 以及微量元素的生物效应的研究都依赖于核分析技术。

三、战略目标及措施

当今世界的许多国家在80年代就相继提出了各种高技术计划, 表明高技术发展的势头正在强化。我们结合我国核技术发展的现状和国际发展动向, 提出近期(公元2000年之前)的核技术战略

发展目标:

1. 逐步建立一批国家开放实验室,适当集中全国的核技术科研人员,探索新的概念、新的方法(或开拓传统方法的新应用)和扩大应用面。力争在一些项目上能跟踪国际水平,个别领域还能有突破性进展,达到国际领先水平。

2. 对已有相当基础或有条件形成的核技术产业,要有重点地加以扶植。可优先考虑小型加速器(包括辐照用和生产医用核素用加速器)、放射性药物和应用核仪器等。

3. 积极发展国家重点支持的能源、材料、生命科学、环境科学中所采用的核技术。在与这些学科的交叉点上寻找新的生长点,并由此产生新的边缘学科和新技术。

为实现上述战略目标,建议采取以下措施:

1. 大力加强、扶植核技术基础和应用基础理论的研究与探索。

2. 大力加强核技术和其他有关学科的互相渗透和交叉。对于交叉、边缘学科,在研究体制上宜采取联合研究模式。

3. 要大力扶植基础和核技术新兴产业的形成。

4. 合理布点,建立若干个核技术研究中心,并重点武装其中的几个国家实验室,使之成为全国核技术发展的研究基地。

5. 大力加强人才交流和培养。

6. 对发展核技术的重要性和必要性要组织力量进行深入广泛的社会调查和宣传,消除“恐核”心理。

核技术需使用一些耗资大的专用设备,如加速器、反应堆等,因而需要较多的初始投资。如果一开始不给予较多的投入,特别是进口一些关键性的材料和元器件,就难以提高核技术的水平。因此会出现一时的“投入大于产出”的现象。而一旦渡过了这个阶段,形成了相应的高技术产业,就会产生越来越高的效益。这已经为美国等科技先进国家的经验所证实。

核技术是核科学中一个发展迅速的学科领域。新的技术和方法在不断地出现,并且从方法的出现到投入实际应用的时间越来越短。我们建议基金会不仅在面上项目中要加强对核技术的支持,在“基金项目指南”中单列一个专题,同时要迅速及时地选准方向,组织几个重大项目,以期取得突破性进展,使核技术的基础研究与应用水平再上一个台阶。

为此,我们建议基金委员会今后三五年内优先支持如下一些核技术研究前沿领域:

1. 核分析技术,特别是微束、超微量、超精细、高精度和极表面分析技术。

2. 同步辐射的应用。

3. 辐射(光子、电子)加工。

4. 功能显象,代谢显象和免疫导向放射性药物。

5. 离子注入材料改性。

6. 核成象技术,特别是工业CT。

7. 小型低能加速器新原理和关键技术。

8. 核测井。

9. 核技术在农业上的各项新应用。

(责任编辑 刘先曙)

(上接第43页)

互,不同的只在於交互的方式。一部最初级的自动化机器,就需要有人—机通讯,机器随时显示自己的运行状态,操作人员通过命令随时改变机器的运行状态。这是最基本的人—机交互方式,工业机器人与操作人员的交互方式属于这一种。更高级交互方式是人—机协调(Coordination)和合作,如人机相互配合共同完成一项任务。再高级就是人—机集成了,即人与机器形成整个自动化系统。

一般容易把人—机交互与机器智能对立起来,以为越有智能的机器则越不需人—机交互(或干预),这是一种误解。其实机器的智能化并不排斥人—机交互,只是把它提到更高、更友善的水平。

此外,还应当看到,人—机交互技术本身也存在智能化的问题,也就是说,需要采用人工智能技术建立新型的人—机交互方式,如适应用户的交互方式(User-Adapted Interaction)。

(责任编辑 宋义荣)

(上接第55页)

作物育种服务。“利用”的含义就是为育种家提供优良的种质作为育种的原始材料,以便育种工作者尽快培育出农作物优良品种为农业生产服务,当然不排除对引进优良品种的直接利用。“创新”是指根据育种需要,通过异源基因导入等手段创造具有某种优异性状的新种质,它们一般没有直接利用价值,但在抗性 or 品质等方面符合育种工作的迫切需要,是人为创造的优异种质。这是一项难度较大的带探索性的工作,由没有育种任务的遗传资源工作者承担是适宜的。另一方面,育种家在培育出新的优良品种时,也是对遗传资源库的反馈。我国有得天独厚的、丰富多采的作物遗传资源,有比较完善的国家种质库及其它研究条件,只要我们顾全大局、同心协力、努力攀登,我国的作物遗传资源工作一定会取得更大的成就,做出更大的贡献。

(责任编辑 蔡今)