

动上还不如花在其他方面。

事实上，情况可能正相反。由于铀勘探活动的减少，IAEA在保存过去兴旺时期获得的数据和“诀窍”方面的作用已经变得更加重要。这些范围广泛的资料及其在其他领域的价值，为向环境科学的其他领域提供重要的援助创造了一些有吸引力的机会。同时，这种机会将有助于保存铀勘探界的专长和技能以备将来之所需。此外，业已证明，铀勘探者的技术和技能，为出现核紧急情况时迅速作出响应提供了可能，而这是任何其他部门做不到的。

IAEA作为参与铀勘探和开发活动的唯一的一个国际组织，和作为汇集铀勘探数据和技术的各种应用的专门知识的中心，是否应该完全听命于目前铀市场的摆布呢？或者说，它是不是有义务去鼓励和帮助更广泛和更充分地使用其成员国花在铀勘探方面的开支呢？

这样一些问题的答案本身，将对这个领域国际合作的前途产生重要影响。

辐射化学：

一个鲜为人知的科学分支

化学中远未被人们认识的这个分支

已经产生深远影响

Vitomir Markovic

辐射化学是化学（有些人说是物理化学）的一个分支，它研究物质受到高能辐射照射时发生的各种化学变化。它采用辐射作为化学反应的引发剂，作为打破某些稳定系统内微妙敏感的能量平衡的能量来源。光化学也打破某些稳定系统内微妙的能量平衡，但使用另一种电磁能——光——作为引发剂。从这个意义上说，辐射化学是光化学的弟弟。辐射化学并不（象放射化学那样）直接与放射性元素打交道，它只是使用这些元素做辐射源，而且被辐照系统与辐射源总是不接触的。

辐射化学的实际应用，如今已扩展到许多领域，其中包括卫生保健、食品和农业、制造业以及远程通讯。但是，只有极少数的人了解这个非常神秘的科学分支能够在哪些方面作出贡献。

起源与发展

辐射化学这门新学科的起源，可以追溯到十九世纪末，即发现X射线后没有多久。如果我们想到，即使是构成软X射线（100—200千电子伏的低能X射线）的量子，也有能力使原子和分子激发或电离，并打断成千上万的分子键，那么对于这样快地观察到X射线的化学效应，也就不足为奇了。人们早就试图弄清辐射诱发化学反应的本质，但由于缺少足够强的辐射源而受阻。当时能诱发出的化学变化，用现在回想起来应该说是十分粗糙而且又很不灵敏的那些分析技术是无法测出的。

许多开拓性的工作是在早期的那几年里做的。然而，这门新学科的存在只是到了40年代初期才得到公认，当时辐射科学和核科学都有了飞速的发展，并有许多突破。生产出了能产生辐射的机器和许多放射性同位素源，辐射输出量是过去做梦都没有想到的。起初，化学家们都是被邀请去帮助别的一些计划，如研究活细胞的辐射效应等。

一些化学家很快就发现，辐射化学除了能解决一些实际问题以外，还能打开在化学中具有重要价值的一些新知识宝库。一个重要的成就

Markovic先生是IAEA研究和同位素工业应用与化学科的辐射化学家。本文主要以最近由IAEA召开的两次咨询组会议（1987年美国马里兰会议和1988年的意大利波伦亚会议）的讨论和结论为依据。



是发现了最强大的化学还原剂，即所谓的溶剂化（或水合）电子。60年代出现的被称为脉冲辐射分解的这种新技术，把化学动力学的各个前沿大大地向前推进了一步。当时曾直接观察到最快的扩散控制反应过程。举例来说，最近（1988年）完成的一本汇编，列举了约3500个反应速率常数，这些反应都是主要靠被辐照系统中产生的自由基引起的。对于在环境与生物问题的研究、在医疗（放射治疗）和在为工业加工技术与反应堆技术中的问题建立数学模型的工作中使用辐射的研究人员来说，这些反应速率数据是非常重要的。

辐射化学确实已经发展成为化学中涉及面相当宽的一个学科。所用的方法和所获得的知识，在其他学科和工业中都有广泛的应用。不过，它是否已被人们，哪怕是相应领域里的专业人员所充分认识了呢？人们普遍感到，只有为数不多的科学工作者才认识到，辐射化学已经给基础化学、应用化学、物理化学和生物学等几个大领域带来了许多好处。

对其他学科的影响

辐射化学的显著优点就在于可用它产生和研究几乎任何中间活性原子型粒子，这些活性粒子在化学反应、合成反应和工业过程中，或在生物体系中都起着一定的作用。辐射化学的各种技术，可适用于气态、液态、固态和非均匀体系。将辐射化学的各种技术与分析化学结合起来应用，人们便能研究多种化学反应的反应机理和反应动力学。

辐射化学在其他学科中的一些应用实例包括：

自由基化学。自由基是一种短寿命的活性原子型粒子，是化学反应中常见的中间体。它们在包括大气在内的人类环境（臭氧层损耗、酸雨、烟雾的形成）和许多工业过程中，都起着重要的作用。在活细胞（植物、动物、人类）中也发生着许多自由基反应，并且可以产生有害和有益两种效应。在存在着氧的情况下，一些水系统和有机系统中形成的氧自由基和过氧自由基，是特别重要的自由基。辐射产生的自由基能够杀死肿瘤细胞，我们人体也利用自由基杀死侵入的生物。不难理解，在诸如生物学、生物化学、医学、营养学、食品保藏和工业等领域，自由基反应方面的知识都是极其重要的。虽然自由基也可用其他手段产生，但辐射化学仍然是获取这方面信息的一个重要来源。

普通化学（有机和无机化学）。辐射化学使人们

辐射化学

辐射化学家对下面几种形式的辐射都很感兴趣：

- 电磁辐射（X射线， γ 射线）
- 带电粒子（包括电子、正电子、质子、重离子）
- 中性粒子（中子）。

这些辐射的能量一般为千电子伏（ $\text{keV} = 10^3 \text{ eV}$ ）或兆电子伏（ $\text{MeV} = 10^6 \text{ eV}$ ）量级。这些能量比原子和分子中的电子的电离能和激发能（数十eV），或原子在分子中的结合能（若干eV）都要高许多数量级。电磁辐射的一个粒子或一个量子，能够使多个分子电离或激发——因此，辐射能引起化学效应的效率较高。

大多数辐射化学实验是利用 γ 射线（来自同位素钴-60）或高能电子（来自电子束加速器，能量为若干MeV）进行的。工业应用中使用的辐射也是这两种。这两种辐射与物质发生作用时，仅仅是使一些轨道电子离开原来的位置，并产生受激原子型粒子、自由基和离子。这么高的辐射能量，不会在受到照射的物质中感生放射性。

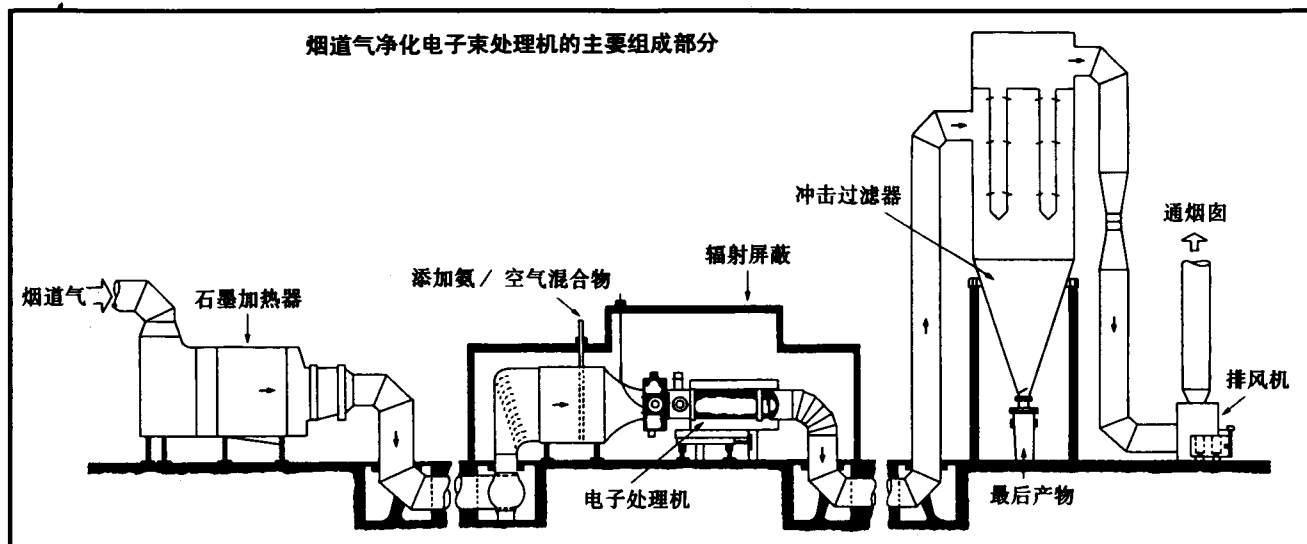
最近，人们对利用中子束、重离子束和很低能量电子（远低于0.1 MeV）的兴趣有所增加。

第一次有机会对化学反应中的许多短寿命中间体，进行详尽的鉴别和研究。由此得到的大量数据，使人们能够更好地理解某些复杂的反应途径，因而有可能建立起各种体系的数学模型。许多基本的化学过程和物理过程，诸如电荷转移、激发子传递、自由基-自由基反应，以及自由基-分子反应等过程，都已经得到广泛的研究。

化学动力学。利用脉冲辐射分解技术，能够对一些活性极大但寿命极短的自由基、自由基离子和受激原子型粒子进行谱鉴别。研究人员正在借助于脉冲辐射分解技术观察速度极快的反应过程，这些反应的发生时间通常是纳秒（ 10^{-9} s ）和微秒（ 10^{-6} s ）量级，有的甚至短到只有几皮秒（ 10^{-12} s ）。脉冲辐射分解技术要使用强电子束的短脉冲，并配上快速而灵敏的检测技术，其中包括叫作光吸收、光的发射和散射、导电率（用于带电粒子）、电子自旋共振（ESR）谱（用于自由基）和拉曼光谱等技术。

核化学和核应用。辐射化学对于理解和控制核反应堆中发生的各种过程是十分重要的。当使用水做慢化剂和冷却剂时，水必然会发生辐射分解。包括金属腐蚀、酸度控制和有机材料的降解在内的其他一些问题，也都与辐射的化学效应有关。

烟道气净化电子束处理机的主要组成部分



一种以辐射化学为基础的新应用正在崭露头角，目的在于除去化石燃料发电厂烟道气中的有毒气体。烟道气是在有氨的情况下被电子束辐照的；这种电子束处理工艺能够除去二氧化硫和氮的氧化物，并且附带地产生一种可被转化为农用肥料的副产品。

实际应用

辐射化学的实际应用已经很广泛，在工业中尤其如此。^{*} 一个很有意义的应用领域是各种用途聚合物的辐射改性。

辐射交联。聚合物的辐射交联能改善绝缘材料的高温性能，在电线电缆工业和橡胶轮胎工业中都已大量应用。经过处理的材料，已用于多种工业，其中包括航天航空工业、汽车工业、电子工业、远程通讯工业以及土木工程。利用辐射非常容易制造具有热收缩性能的薄膜、带、管和接头等聚合物制品。

辐射消毒灭菌。一次性医疗用品的辐射消毒灭菌，正在成为医疗工业中人们喜爱的一种方法。化妆品、某些药物和制药工业中的各种原料，也正在日益广泛地接受辐射消毒灭菌。这些应用在很大程度上取决于人们所掌握的物质的辐射效应方面的知识。

辐射固化。这种处理基于辐射诱发的聚合反应。与热固化和紫外线固化相比，它能产生质量更高的产品，同时能够减少或消除环境污染，并能降低总成本。它已被用于表面涂层固化、粘合剂固化、层压件和印刷业等方面。

食品辐照。这种工艺过程的采用，一方面基于生物和感官试验，另一方面基于有关辐射对食物制品及其组分的化学效应的了解。可以肯定地说，人们对辐

照食品的化学状况的了解，比对烹调过或用其他方法处理过的食品的了解更多。

新出现的应用。其中包括用辐射处理燃煤和燃油电厂排出的烟道气，除去二氧化硫和氮的氧化物等有毒组分，以保护环境。处理后得到的产物，可以转化为农用肥料。^{*} 在其他研究领域，正在利用聚合物表面的辐射改性或各种生物活性物质的辐射固定化，开发一系列的生物医学应用。^{**}

趋势和发展

国际原子能机构曾于1988年11月在意大利的波伦亚召开了辐射化学专家咨询组会议，以评估17个国家中的趋势与发展。与会专家来自奥地利、加拿大、中国、丹麦、德意志联邦共和国、法国、德意志民主共和国、匈牙利、印度、以色列、意大利、日本、芬兰、波兰、联合王国、美国和苏联。

会上发表的报告评述了辐射化学方面许多正在开发的应用。它们包括光化学贮能用的聚合物体系；辐射致敏/抗辐射聚合物；各种环境应用（例如，水中污染物质的处理）；辐照对腐蚀的影响；以及药物与生物活性物质的固定化。

对未来的思考。辐射化学现在已对科学知识和工

^{*} 见《国际原子能机构通报》(中文版)第29卷第2期25页(1987)和IAEA TECDOC-428(1987)。

^{**} 见，IAEA TECDOC-486(1988)。

^{*} 见，例如IAEA Bulletin, Vol.27, No.1(1985)p.33。

业过程有了这样大的贡献，将来又会如何发展呢？它的潜力是否正在被充分认识和开发着呢？辐射化学作为一门学科，目前处在什么位置？不久的将来它又会处在什么位置呢？

目前有一些令人忧虑的征兆。

和辐射化学已经起到的作用相比，辐射化学界的人数较少。世界上正在从事基础性研究的辐射化学工作者只不过几百人，在辐射加工工业中工作的人数或许也有这么多。

虽有极个别例外，但在大多数国家中，分配给辐射化学的资金一直在削减。尤其严重的是，在大多数大学的课程表中，都没有辐射化学这门课，即使有也是名存实亡。

这种令人遗憾的状况源于这样的事实，即实质性的研究需要动用电子加速器之类昂贵的辐射源，或使用虽然便宜一些但用起来不够灵活用途又有限的钴-60 γ 辐射源。另外，也许还需使用高级而昂贵的分析设备。因此，大多数辐射化学工作者要么以核科学研究机构为基地，要么在工作时专程去使用这些机构的设施。从某种意义上说，可以认为这种作法是可取的，因为这使辐射化学工作者得到了最好的仪器设备的支持和有辐射源可用。但实践表明这样做也有一个缺点，因为它会使辐射化学工作者与化学界的主流失去联系。事实上，最近一些年中，辐射化学在许多大学中的影响一直在缩小而不是扩大。所以，化学系的大多数教师和学生，对于辐射化学能够对他们所从事的工作做出什么贡献一事，有的全然不知，有的也只略知一二。这多多少少是可以理解的，因为辐射化学的效果相当分散，因而多次发生过这样的情况，即实际是用辐射化学方法得到了的结果，人们却以为是其它方法得到的。

在许多场合，辐射技术在工业方面的成功应用所带来的效益，往往直接来源于对辐射化学研究的投资面较宽。不过，在一些发展中国家中，辐射技术的转让，并不总能得到原有基础研究基地的充分配合。而在工业化国家中，一项技术一旦被工业界所采用，往往就会出现减少相关领域的基础研究活动的倾向。这些趋势如得不到扭转和纠正，从辐射技术不断获得新效益的愿望，也许就不能完全实现。

一些好的发展

也有一些向好的方向发展的迹象。例如，马来西亚正在高度优先地发展包括辐射技术在内的新技术。

在医疗工业中，外科手套的 γ 辐射消毒灭菌方法，已经应用了许多年。最近，在吉隆坡附近的核研究中心，已经建成了第二套工业用 γ 辐照装置。此外，在给当地工业引入紫外线固化和电子束固化技术的工作也在进行，并且正在考虑橡胶乳液的辐射硫化问题。该核研究中心已认识到加强这个基础研究基地的必要性，曾在 IAEA 帮助下，于 1988 年组织过一期以辐射化学基础知识及其应用为主要内容的一国培训班。4 名外国讲师和一些本国工作人员，曾为 18 名学员和许多旁听者授课 80 小时。

在日本，日本原子能研究所的大坂辐射化学研究中心 (TRCRE)，正在卓有成效地为应用辐射化学和工业牵线搭桥。由于双方的共同努力，聚合物方面的辐射化学新应用仍在不断出现。辐射处理在环境保护方面的应用，已经得到广泛研究。TRCRE 的一个新项目涉及离子束在材料科学和生物学中的应用。已经制定了建立一批离子束设施的规划，它们将被用于促进该领域的国际合作。

在其他地区，有关辐射化学的技术及其应用方面的知识，也正在通过情报交流的方式加以传播。1988 年在法国马利勒鲁瓦举行的大型学术会议，吸引了辐射化学领域大约 100 名讲法语的科学家，有基础科学研究人员，也有应用科学研究人员。这次会议为评述法国在辐射化学方面的研究成果，和考虑这方面的未来，提供了一个机会。法国在该领域的活动历史悠久，硕果累累。

在苏联，由 A.K. Pikaev 主编的一套现代辐射化学专著，取材全面，质量极佳，最近已由莫斯科科学出版社出版（仅俄文版）。这套专著共三卷，主要论述辐射化学的基本原理和实验技术与方法；气体和液体的辐射分解；以及固态物质和聚合物的辐射效应，并包括一些应用问题。

下一步的工作

为了保证将辐射技术有效地传播到那些感兴趣的国家和地区，似乎有必要对辐射化学方面的基础性研究给予更有力的支持。

在近期可以采取的一个步骤，是加速进行把辐射化学研究中产生的知识结合到各种传统化学分支中去的工作。这样就有可能将辐射化学与放射化学及光化学一起列入化学系的课程表。希望机构在其成员国的合作下，在这些工作中起到显著的作用，作为它在这个重要领域中所做工作的一部分。