

中、德、美、英、日  
五国化学会白皮书

元素战略

第五届化学科学与社会高峰论坛（CS3）

日本成田

中国化学会译

2013年9月



参加 2013CS3 会议的全体代表

## 介绍

每年的化学科学与社会高峰论坛（CS3）汇集了来自世界各地最优秀的从事化学研究的科学家，他们针对社会最迫切的需求提出创新的解决方案，这些需求涉及健康，食品，能源和环境等方面。这个独特的 CS3 研讨会采用一种创新的模式，聚焦国际科学发展方向导航，举办方式为所有参与国每年轮换。“元素的有效利用”作为第五届 CS3 的会议主题，本届会议于 2013 年 9 月在日本成田市举行。来自五个参与国的超过 30 多位的化学工作者共同研究，确定和阐明了由于对稀缺元素需求的快速增长而带来的问题，并提出了合理的，有意义的方法来解决社会面临的这些严重问题。本文汇总了第五届 CS3 与会科学家所讨论的问题摘要，主要包括我们所面临的资源问题总结以及我们必须如何做，以及寻找有效的解决方案。

CS3 是中国化学会（CCS），德国化学会（GDCh），日本化学会（CSJ），英国皇家化学会（RSC）和美国化学会（ACS）共同合作发起的。一年一度的研讨会是由中国国家自然科学基金委员会（NSFC），德国研究基金会（DFG），日本学术振兴会（JSPS），英国工程和物理科学研究委员会（EPSRC）和美国国家自然科学基金委（NSF）支持。

## 执行摘要

过去的几十年，技术领域取得了巨大的进步，特别是在通信，信息技术和消费品方面。这些给人们带来了前所未有的舒适和便利，提高了医疗的诊断和治疗，以及为人们提供了更高效的运输和快速获取大量信息的能力，这些变化在上一代人是不可想象的。随着人口的增长，许多非工业化国家的人们也希望获得工业化世界的物质享受。

基于我们在物理和化学认识的发展和进步，很多进展已经实现。最近，驾驭元素特殊性的能力取得了一点进步，如增强的磁性材料，更小体积的微处理器，更高效的太阳能电池，更轻的结构材料，以及其他大量的先进技术。这些创新在一定程度上满足了社会的需求和欲望。

大部分新技术在很大程度上依赖于稀缺元素。据报道，工业巨头通用电气公司在其产品线中使用了前 82 个元素中的 72 个，并且其中许多元素都是极为罕见或难以获得的元素<sup>1</sup>。智能手机，平板电脑和其他电子消费品的广泛流行引起了稀土元素如铈，铽和镧等需求的增长，因为这些电子消费品的制作技术要依赖于这些稀土元素。

很多能源替代技术依赖于稀缺元素，因此这些技术的使用受到了很大的限制。光电器件提供了一种潜能，成为一种可持续的，万能的能量来源。下一代光电器件设备通常含有稀有

元素如锆，碲和铯。无需使用这些昂贵金属的高性能设备的发展将极大地降低成本并进一步提高太阳能发电的经济可行性。燃料电池是另一个需要稀缺元素的区域，如高温型燃料电池中的铈，和低温设备中的铂。特别值得关注的另一个领域是在高性能磁体中钕和镝等稀土元素的使用。这些重要元素用在磁性材料中，可在高温设备中使用，如电动汽车（包括混合动力汽车，以及风力涡轮机发电的使用）。对元素更有效的利用方式，以及替代方案是一个必须解决的严重问题。

像钯，铑，钼，铂，铱等贵金属经常用作医药、大宗化学品，以及家居消费品生产的催化剂。汽车催化转换器仍然占据很大一部分铂和铑的需求。

发展多种方法来解决物质匮乏的问题，以及多方位的解决战略也是必要的，以避免出现严重破坏。在某些情况下，稀缺元素可以通过地球上一些丰富的元素来代替，这是可取的，但并非总是可能的。常常一个或一小群特定的元素的独特物理和化学性质是一个特殊应用所必不可少的，并且即使可以进行替换的情况下，往往也有一些重要性能的损失。在其他情况下，有可能通过优化结构或优化操作条件来降低重要元素的使用量，或者通过其他同族元素的存在，来实现所需的性能。因为事实上元素是非常有限的资源，元素的集中回收和循环再造是非常重要的。其中，至关重要的是这些重要资源的合理利用要考虑到整个使用周期，从采矿，制造，回收和再利用。

解决这些问题需要一个协调的，全球性的方法。培养科学家和工程师的支持投入，以及在研究设施（包括大学，产业界和学术界之间的竞争前协作和沟通）的公共和私人投资，对于解决社会所面临的严重资源问题是至关重要的。此外，明确的公共政策和以科学为基础的法规是必要的，以确保一个协调的，连贯的和国际间的合作努力。这些不是由任何一个国家，企业或机构就能解决的问题。

之所以需要采取行动，一个有说服力的例子就是“磷峰值”。磷，虽然不是稀缺元素，但是对生命是非常重要的，我们知道它在地球上，是绝对不能替代的，同时人类也不能实际生产磷元素。目前，磷矿石一年开采 2000 万吨，其中 90% 用作肥料，全球约三分之二的农业生产要依赖于磷。预计磷酸盐的短缺将发生在未来 50~150 年以后，如果磷缺失的话将导致严重的饥荒。磷的问题不是不能解决的，首先它是一个丰富的可获取的元素，其次改变农业生产，提高磷的使用和回收，解决人口问题，这些都是合理的解决方案。但是若无作为，可能会导致非常可怕的后果。但必须强调，重要元素消耗有潜在的比“石油峰值”和全球变暖更严重的问题，而且可以清晰地看到，全面的行动必须现在就采取以避免将来重要元素供应中断。

## 介绍

保护资源一直是人类社会的一个主要活动,随着技术的发展,对资源的需求也随之变化。随着工业革命的出现,除了农业商品(如木材,羊毛和棉花)之外,矿产资源和化石燃料的需求急剧增加,当然这些也有很大的政治和环境影响的原因。20世纪工业的进步导致了更大的需求和消费。在21世纪初,资源的需求依然贪婪,事实上已发展到对包括很多稀缺的或者难以取得的元素的需求渴望,当这些资源被使用后,给环境留下一个很大的影响。这些元素中有许多元素没有足够的存储量作为主要开采目标,实际上这些元素是在精制其它矿物时提取的副产物。这些稀缺元素通常在普通矿石中以原子的形式存在,并不是以一个单独的矿物存在,一般是作为杂质存在。举两个例子,一个是碲,是精炼铜的副产品,另一个是铟,与锌和铅矿石同在。一种稀缺元素的可用性,可直接关系到一种日用品的需求。



图 1: 一个智能手机中存在的元素

但是也有一些经常被描述为非常重要的其他几种元素。例如,由于其极高的活性和化学选择性,贵金属如钯,铑,钌,铂和铱经常用于医药品和大宗化学品的制造,以及作为制作家庭消费品的催化剂。用在混合动力汽车和现代电动发电机中的电动马达的高功率密度磁体需要稀土金属如钆,铽,镱和铕,以便在高温下可操作。并且汽车催化转换器仍然占据很大一部分铂和铑的需求。此外,现代的电子设备,如计算机和智能手机包含一个复杂的元素混合物体系,如铟和其他许多稀缺的,并且很难被回收的元素。

认清稀缺元素和重要元素的区别是很重要的。稀缺元素是在地球上以低丰度存在的元素,例如铂或碲。一种稀缺元素如果需求低,那就是非重要元素。而另一方面重要元素可能实际上并不罕见,但需求很高,供应可能会受到限制或由于技术,政治或社会因素存在风险,或取得该元素可能造成很大的环境负担。确定哪些元素是重要元素超出了本报告的范围,元

素的重要性和稀缺性的详细讨论可以在其他报告中阅读<sup>2</sup>。

资源枯竭的迫在眉睫的危机不仅限于贵金属。虽然锂的蕴藏量非常丰富是众所周知的，特别是在阿根廷和玻利维亚等地区，但是考虑到锂电池需求的大幅增加，除了延长开发电池的使用寿命外，应认真考虑电池的回收策略。以目前的技术，储备充足的锂可以为 120 亿辆汽车提供电池，因为它并不是一个真正的燃料，也不是被消耗掉，可以当电池出现故障时，被回收利用。尽管如此，由于需求量大，锂的使用也应在经济效益，环境相容性和稳定性的供应方面多加考虑。

**表 1：重要元素的例子**

元素	使用	储备情况
铍	制造精细化工和商品化工，医药，尾气催化剂	可消费 160 年
铂	制造精细化工和商品化工，医药，尾气催化剂	可消费 160 年
铟	电子，触摸屏，LED 灯	可消费 24 年
碲	太阳能电池	不清楚，与铜矿一起存在
钕	高性能磁体，激光器	截至 2010 年，可消费 420 年。需求正在迅速增加
镨	高性能磁铁	可消费 209 年，但需求正在迅速增加

\*Halada, Katagiri. *Proc. Of EcoBalance* 2010, pp 609

**表 2：能源和元素**

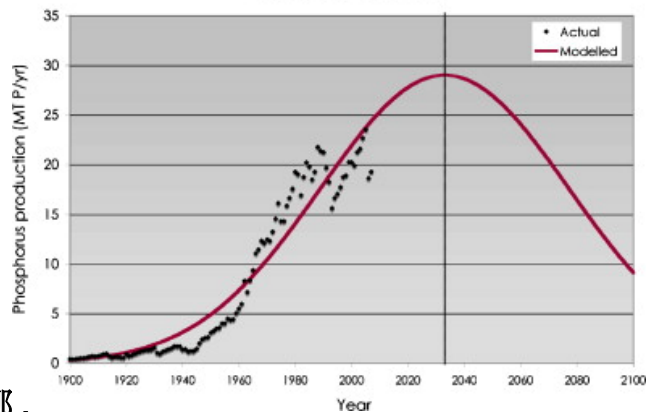
技术	应用	重要元素
电池	运输，电子，发电系统	锂
光伏器件	太阳能发电	铟，镓，锗，碲，钇
磁铁	发电机（风力发电机组），电动机	钕，镨，铽
超导体	化学和医学成像，运输，计算机和电力传输	氦气，镧系元素
热电	发电	碲，铋，铈
燃料电池	发电，交通运输，移动电源	钕，钐，铂

提高效率的许多新技术需要大量资源的支持，以及正在开发的可以减少对一种或多种资源压力的技术，也在很大程度上依赖于那些缺乏的和/或很难获得的元素。例如，现代的液

晶电视比旧的阴极射线管装置更节能，但是，它们需要大量的稀缺元素。因此，既在整体水平，又在特定应用水平上重视元素利用的有效性是绝对必要的，以便找到平衡的解决方案。

除了解决技术难题，同样重要的是要考虑社会，政治和经济的挑战。虽然自由的市场经济机制和社会传统可以有效地应对不断变化的世界，但是资源枯竭已达到了非常严重的程度，因此，政府的监管和立法，以及政府，企业，大学和其他社会机构之间的直接合作是至关重要的。

不采取行动的结果可能很严重。我们对最新的现代技术的依赖已经变得非常大，尤其是对电脑特别依赖，一些重要元素的缺乏不仅可能阻止新设备的生产，而且当这些设备已超过其使用寿命时，重要元素的缺乏也会阻止设备替代品的生产。这不是一个假设性的问题，很多元素对现在的技术具有重要作用，这些元素探明的储量将在几十年内消耗殆尽，这并不是耸人听闻。根据目前的消费趋势和探明的储量，银，铅和锡预计在短期内可供给 30 年<sup>3</sup>。当然，这并不是说新的储量不会被发现，而是新的储量可能非常难开采，在经济上是不可行的。更令人不安的是磷可能出现耗竭的情况。全球的磷需求量为每年约 20 万吨，并以每年 2.5% 的需求速度增长。目前，并不能清楚地探测到磷的储备，因为开采者们报告的磷储备数据并没有被正式确认。磷元素是特别值得关注的元素，因为目前全球三分之二的粮食生产依赖于磷肥，没有它，全球三分之二的人口或超过 40 亿人会挨饿。虽然可开采的磷矿突然消失的情况不太可能发生，但是易获得的磷矿石的消耗已经到了一个严重的地步，可用的磷矿石含量显著降低。因此要求必须解决目前的消费问题和农业实践问题，以及人口问题，以避免严重的粮食短缺。必须强调的是磷是生命所必需的，也是绝对不能替代的。



## 化学的功用在哪。

化学是关注什么能构成材料，它们如何变化和反应，以及它们如何被人类创建和控制。

化学也关注能源通过什么变化释放或消耗,以及如何控制它。化学是所有科学和技术的基础。化学对于那些需要新材料或者在分子或原子水平操作的技术尤其重要,例如太阳能电池和燃料电池,蓄電池和微处理器等。

元素的有效利用可以分为几个方面。使用储存丰富的元素替代重要元素是一个主要的战略目标,例如,用铁置换钨,作为交叉偶联反应的催化剂。但是替代的方法并不总是可行的。通常,通过优化反应条件或使用助催化剂很容易降低反应使用中的重要元素的量。有此做法的例子不胜枚举,但是,这些进步往往需要投入大量的研究工作。有效的回收可以在某些情况下部分缓解供应的问题,例如,铁和铅被广泛地回收。因为元素的属性在使用中不被改变,如果所需要的元素在使用结束时,可以从产物中回收,它可以进一步被使用,并且可以减少天然储量的压力。回收也不是一件容易的事情,它需要大量的应用性研究。在许多应用中,重要元素的用量是非常小的,从而使分离变得相当困难。有些元素是不可替代的,因此需要开发全新的材料和系统来达到使用目的,这是一个非常大的挑战。这些通常不仅需要应用的发展,而且需要基础研究的发展。最后,提供合理的监管和公共政策研究是必要的。除了确保足够的资源可供研究外,各国政府需要通过立法和监管政策大力鼓励社会层面的改变。例如,应鼓励制造商,或在某些情况下强制制造商,在产品的设计过程中进行全生命周期分析,进行资源回收,应鼓励或要求消费者在产品使用寿命结束时返还产品。

本文中,化学研究和开发的领域对技术的进步和元素的有效利用是非常重要的,可分为三方面。**能源材料**,即用于制造太阳能电池和燃料电池,蓄電池,磁铁,以及在能源生产和使用中的其他设备材料,常常包含重要元素。**催化剂**在许多制造业领域是绝对重要的,特别是大宗化学品的制造,而且往往含有贵金属催化剂。**回收,再利用和再循环**在短期内是非常必要的,从长远来看也是很重要的,因为我们生活在一个资源有限的地球上。化学世界是全球化的经济,并且许多元素的分布并不平均,因此各领域的国际间合作和努力是很重要的。

### 能源材料

从工业革命开始,可靠能源和有效发电方法的需求一直是人类关注的焦点。尽管显著地提高了效率和极大地降低了环境的负担,但是持续对化石燃料的严重依赖导致了严重的环境影响,如环境污染和全球变暖。为了维持目前的生活标准,发电和储存能量的优良方法是必不可少的,而且随着人口的增加,技术上更多的改进是必要的。其中正在探索的解决能源需求的各种技术,有许多需要使用重要元素,并充分利用它们,高效利用或替换的问题必须得到解决。

一般认为发电属于工程领域,但化学发挥并将继续发挥至关重要的作用。燃料燃烧,充



放电循环电池，以及燃料电池的操作都涉及很多化学反应，在现代设备中使用的材料的设计和结构，都需要复杂的化学知识。新材料的寻找和合成，需要考虑原料的反应性和商品的功能和应用性。此外，考虑构建这些新材料时所使用的元素的实用性和附带的影响也变得越来越有必要。把元素的高效利用作为参考的材料设计是一个相对较新的方法，要求在化学教学和研究思路增加这项内容，因为资源稀缺的情况已经获得大众认识，这些新现象已经出现。对于能源材料重要元素的详细讨论可以在其他报告中阅读<sup>4</sup>。在能源材料领域中，也有大量重要的领域。

### 蓄电池

电池正变得越来越重要，无论是在移动设备应用中，还是在固定应用中（家庭应用，生成系统备份，稳定电网）都变得越来越重要。新型蓄电池有许多设计目标，包括比能高，长期稳定性好，高流动性和增强安全性。改进的蓄电池设计需要活性氧化还原对的稳定氧化态，优化电解质以达到在一个特定的使用温度范围内保持稳定和合适的离子导电率，并搜索丰富的轻元素组合，该组合可作为有效的氧化还原对。替换重要元素（如钴），并寻找适当的催化剂，对于金属空气电池来说也是必要的。

目前几种化学电池可商业化，每种化学电池都有独特的良好品质，并且每种电池自身的弱点也会随着进一步的深入研究被解决。举一个例子，锂离子电池，具有高能量密度及消费电子业已经证明的优良功能，锂离子电池是当前大多数电动汽车的选择。不幸的是，该电池的高成本，有限的循环寿命，应用的局限性，以及持续的安全考虑已经阻碍了电动汽车的普遍使用。目前锂离子电池的主要安全问题之一是由于液体有机电解质的存在。当暴露在较苛刻的条件下时，如较高的电池温度或高电压应力下，这些易挥发和易燃液体会出现严重的火灾风险。同样，被损坏或过度充电时，锂聚合物电池可能遭受灾难性的毁坏。用固体的，不可燃的电解质取代有机电解液会消除这种安全风险，并提供其他的重要优势，如大幅延长循环寿命和降低自放电率。此外，回收和再利用的策略需要被广泛采用，以确保这些系统所必需元素的可靠供应。

### 光伏设备

由于太阳光的大部分能量传递到地球，因此太阳能被看作是一个极具吸引力的能源。目前光伏发电技术正在迅速接近由 Shockley 和 Queisser 预测的最大效率，同时硅光电池，作为最常见的商业化光电池类型，在实验室条件下可提供 25% 的电源转换效率。尽管硅光电池商业化的使用效率达到实验的 75%，但基于硅的单位成本仍然过高，不足以与化石能源

竞争。硅本身很便宜且储量巨大，然而，提纯到所需纯度耗能巨大。发展更便宜的生产方法将大大提高目前光伏电池设计的经济可行性。通过将吸收材料与每个模块使用的材料的光学性能结合，努力降低太阳能电池和薄膜二代设备的成本。但是由于高温加工的必要性，第二代光伏模块的成本仍然很高，有必要降低与廉价基材的相容性，以及使用必要的贵元素（如铟，镓，锗，碲，和钎）来降低成本。一个大的目标是发现新材料，该材料具有期望的特性，但是由地球上丰富的元素制成。以及需要设计一个系统，它具有最小的电阻损耗，并可以通过纳米晶体或多晶薄膜中的单个沉积实现批量载流子传输。一般地，较好的电荷迁移率和有效的电荷分离是电池的关键因素。

## 磁铁

对可再生能源的依赖以及对整个生命周期内能源总能量效率提高的关注，促进了能源相关技术的加速研究。磁铁在能源生产和能源的使用中无处不在，并在改善这些应用中的许多设备的效率和性能中起着重要作用。硬性磁铁在许多消费品和工业设备的重要部件中具有非常重要的作用，对可再生能源部门也特别重要。电动汽车和风力涡轮机的电动机、发电机需要可以保持温度稳定在高于 120 度的磁铁。为了满足这种要求，需要使用含有稀土元素如钕和镝的磁铁，其中镝是稀缺元素。更有效地利用磁性材料中的稀土元素是紧迫的，减少并最终用更丰富的元素替换这些元素也是必须的。此外，稀土平衡也需要加以解决。这些元素不会单独在矿石中存在。应该降低对稀缺元素的需求，例如镝和钕。而开采广泛存在的元素，如钐和铈。为了开发不依赖于稀缺的稀土资源的高效磁铁，有必要开发磁性材料，该磁性材料不一定具有最好的绝对性能，但要提供所需的一些性能，同时确保原材料供应的安全和廉价。例如，磁性各向异性在高磁化三次三维系金属和合金（例如 FeCo）中产生，该过程是通过诱导薄膜外延生长产生的四方畸变实现的。化学能找到解决方案，通过散料间隙和置换改造以稳定这些结构。

## 超导体

超导体是一种在低于临界温度下传导电流而无能量损失的材料。用超导制造的磁铁可以产生很强的磁场，它可以实现很多应用，像磁共振成像（MRI），核磁共振（NMR）光谱仪，质谱仪，粒子加速器和超导列车。目前，这些装置必须使用液氮降温，以保持亚临界温度。氮是一个重要元素，并且本质上是不可回收的，一旦它逃逸到大气中，将不可恢复。所谓的高温超导体，可以用液氮进行有效地冷却，但是它们是易碎的，难以加工。迄今没有室温超导体的存在。

一个基本挑战是能够预测或确定超导材料具有的特性，如探究组成元素的丰度和毒性，

并且如果可能的话，探究可以接近室温的超导材料。理论家和化学家之间的沟通，探究化学事实，可能会导致材料发现的加速。室温超导体可以大大减轻全球能源问题，提供更快计算机，并允许运输的能量不损失，以及其他方面的优势。然而作为近期目标，发展易加工液氮温度超导体可以在短期内提供显著的好处。

### 热电材料

热电发生器被用于转化热梯度为电能。这些设备利用两个导电材料之间的依赖温度的电势，不需要运动部件协助。原则上，这些装置可以用来从机动车辆，涡轮机，燃料电池或其他发热设备的热废气流中进一步收获可用能量。已知有些材料在效率，寿命和使用的重要元素方面存在不足。一些已被开发作为热电材料的化合物含有铅，铋，碲，钴，镱，铈和铟。这些元素不适合于大规模设备的生产。正如超导体，设计的性能和预测的能力是非常吻合的，理论家，实验化学家和材料科学家的通力合作，可能会带来很大的进步。

### 燃料电池材料

当前存在许多不同类型的燃料电池，它们在工作温度，燃料，大小以及一些其他标准，特别是结构方面存在着差异。高温固体氧化物电化学电池被用于烃类燃料高效转化为电能，并产生氢的蒸汽。因为其自身的特点，他们表现出稳定应用的潜力，并且不需要铂族金属催化剂。镧系元素的钙钛矿被广泛应用在固体氧化物燃料电池的阳极和电解池的阳极，被用作两个电子导体和电催化剂，减少镧系元素的使用或通过更可持续的元素替换将是非常可取的。目前所选择的电流电解质是基于氧化锆，通常掺杂有氧化钇或氧化铈。含有更可持续元素的新材料类似性能的实现将显著提高这些技术的可行性。蒸汽或合成气体的催化电解要求类似于上述的那些材料。

除了固体燃料电池需要高操作温度，使用聚合物电解质膜的低温燃料电池也正在被广泛地研究，并已发现许多应用。不像固体氧化物燃料电池，聚合物电解质膜燃料电池在非常低的温度下，以及更轻，更紧凑的操作，使之更适宜于移动设备应用。然而，这些低温燃料电池的可行性仍然存在显著的挑战。目前，最好的低温燃料电池利用铂，一种重要金属，作为催化剂。目前，核-壳纳米结构正被研究用于实现超低铂负载，以及探究非贵金属催化剂，如混合氮的碳和钨的碳化物，它具有和铂相同的电子结构。碱性聚合物电解质可以使用非贵金属催化剂，但是这些聚合物的离子电导率和化学稳定性仍然是一个挑战。但据报道已取得显著进展。除了上述问题，聚合物电解质膜燃料电池可在 100–150 摄氏度操作，可提供许多优点，包括更快的反应动力学和可耐受的燃料污染物。该交换膜只在低于 90 摄氏度潮湿的条件下工作。

## 贮氢

氢的存储提出了一个不寻常的问题，虽然它按重量计具有良好的能量密度，但是按照体积计，具有能量密度低的特点。例如，一公升汽油含氢量比一公升纯液态氢超过 64%。因此，为了储存氢，将其应用于体积显重要的应用例如汽车，可行的替代策略是必要的。一个可能性是作为金属氢化物配合物存储，如  $\text{LaNi}_5\text{H}_6$  或  $\text{Mg}_2\text{NiH}_4$ 。由于燃料电池的广泛使用，氢存储技术将变得越来越重要。

## 催化剂

催化剂在改进反应过程中的能源效率和元素的高效利用方面发挥着重大的作用。许多反应过程变得更加经济化，这些都是催化剂的功劳。由于其本身的性质，催化剂的使用量很小，并且在许多情况下，催化剂的使用是可以回收的。对于一些过程中，能量效率、元素使用和其他因素的平衡已经达到最佳。但是一些地方的科学家还在为进一步优化催化而继续努力。

催化与现代社会发展的方方面面相关，包括清洁的空气，干净的水，食物供应，能源生产和储存，运输，大量化学品和原料等。催化在许多前面提到的能源材料中起着重要的作用。燃料电池的关键是催化剂，它促进燃料在适中温度下的氧化效率。太阳能驱动的催化分解水的成功，作为一个非常重要的研究领域，该成果依赖于开发复杂的串联式催化体系。

许多催化剂都是基于重要元素，这些元素可能是非常罕见的或被认为近期供给有风险的元素，这些元素的提取可能产生较大的环境负荷。为了维持目前的生活水平和提高更多人的生活质量，有必要更有效地使用催化元素。催化重要性的详细讨论可在以前的报告中阅读<sup>5</sup>。

在催化造福社会发展方面，人类还面临着一些挑战。

### 由广泛存在的元素制成的催化剂

必须设计新的催化剂，而且这些催化剂要基于那些丰富的，容易获得的元素进行设计。基于地球上丰富的，容易获得的金属以及不含金属的催化剂应该被设计。广泛存在的元素催化剂有可能在消耗和高分散的使用中是非常有用的，其中所述催化剂不能被回收和再利用。这方面的一个例子是铂催化剂在生产交联聚硅氧烷中的使用。

铁，一种很常见和廉价的元素，具有优良的生物和环境兼容性，能够作为基本金属催化剂的一个例子。难于用铁和其它第一行的元素作为催化剂的原因，是因为它们倾向于发生单电子反应，而贵金属催化剂，如钯和铑，一般进行双电子反应。更明确地是，铁通常以氧化态为 0 价，I 价，II 价和 III 价形式存在，而铑通常以 I 价，III 价和 V 价形式存在。由于铑的氧化态，通常是通过双电子反应，反应可被约束为双电子反应化学，也就是说，氧化加成/还原消除。另一方面，铁易发生单电子反应化学，例如，自由基化学，该反应是难以控

制的。然而单电子反应化学可以提供新的化学发展机会。毕竟，在生物反应中使用的金属主要是第一行的金属元素，并且利用多金属活性位点和/或生物配体，能够非常有效地催化大数目的反应。奉行这样的原则可诱导目前使用的催化剂替代方案出现，也有可能诱导新的反应和应用。

记住，用一个元素直接替换另一个元素可能不会实现预期的效率，但是，通过发现新的化学反应与丰富的元素，有可能通过不同的途径来实现预期的目标。在过去的十年中，有机小分子催化剂已经取得了显著的进步，这可能会产生一个备用策略，即生产精细化学品和大宗商品可完全绕过贵金属催化剂而实现。

### 催化剂效率的提高

提高催化剂的效能和效率有助于降低对重要元素的需求。除了关注金属元素，围绕活性位点和配位体的氧化态环境也应予以考虑。在固体催化剂中，活性位点的数目应该增加。这意味着，具有催化活性的元素应集中在与底物发生反应的载体的表面上。对于均相催化剂，增加了每个位点的活性是有用的，这是评价一个催化体系的基本指标。对于均相和非均相催化剂，改良的选择性是令人满意的。

催化剂应该更强大（特别是较活泼的金属基复合物催化剂）和更抗失活。具有自我修复能力的催化剂（例如钙钛矿支持的纳米颗粒）也应该得到发展。这对于基本金属催化剂特别重要，因为它们更容易被氧化。

另一个需要注意的应用是在汽车中使用的催化转换器。尽管从汽车催化转换器中回收贵金属被广泛实施，但也是有损耗的，而且铂族金属是罕见的和昂贵的。在文中这个背景下，有机会提高使用铂和铑的效率。

### 催化的整体设计

在催化设计中，应该考虑整个系统的结构，包括配体，外球面，长范围和扩展的结构。

重要的是，催化剂的命运应包括在设计中。去除，回收和再利用要有设计，以及考虑有害残留物，如配体或载体。单独回收不足以完全解决问题，因为每次回收难免有些遗失，以及回收时涉及相应的能源和资源成本。对于大宗化学品的生产，许多催化过程已经高度发达，并且除了催化剂的高效性外，催化剂回收已被列入设计范围。

### 催化剂的基本认识

为了完成这些挑战，非传统催化剂的新的基本理解必须创建。如前面提到的铁，有效地使用基本金属作为催化剂，学习利用第一行过渡金属配合物的单电子反应化学，这很重要。更深入地了解非金属催化剂的反应，如掺杂氮的石墨烯，将是有益的。以及学习控制催化剂

反应时配位体的参与情况，也是有益的。增加对有机催化的认识也将大有益处。此外，新的指标来评估催化剂的使用效率，必须要发展。像提取效率（如1吨矿石提取3克铂金），能源利用率，碳足迹和分布熵等都需要考虑在内。催化剂的寿命，回收成本，残留在产品上的影响，以及配体和金属的命运必须予以考虑。必须承认，最初的催化剂成本通常不是催化剂选择的主要驱动力。

催化清洁能源和清洁生产的应用已经取得了巨大的进步，有助于生物可再生原料的使用，水生成氢气，以及二氧化碳作为原料的应用。在解决这些重要的当代问题时，催化的重要性提供了额外的诱因，以鼓励人们在这一领域努力。催化仍然是研究和开发的重要方面，以及持续的支持也是至关重要的。

### 回收，再利用和循环利用

许多元素的回收，如铝，铁，铅被广泛地实施回收，并且原则上这些元素可以被确立为重要元素。由于铂族金属的高成本和工业制造时的不可或缺性，回收的协议已被制定。此外，它们与铜在电子废物回收时一起被提取，并可以进一步细化出来。然而在一些应用中，贵金属的浓度相当低，回收被认为是不经济的。在当前的回收协议中，稀土元素倾向于形成氧化物，并不与炉渣分区，也就是，该过程的废弃物未被回收。当这些重要元素的需求增加时，这些问题必须要解决。从电子废弃物回收重要元素的详细讨论可在以前的报告中阅读<sup>6</sup>。

### 稀土元素

如在上一节中所述，稀土元素被用于电池，照明和磁铁中，特别是硬性永久磁铁中，例如在风力涡轮机中使用。目前这些元素的回收是有限的，应用后，大多数稀土元素的回收少于1%。一些稀土元素丰度特别低，特别是镱，它被少量的使用于磁铁中，以保持高温下的强磁场。但是这样低的使用浓度会妨碍广泛的回收，由于产品的性质和材料的分散性，一般认为，回收它是既困难又昂贵的。恢复方法，包括液体-液体技术，氢歧化反应，脱氢和重组，溶解在熔融的镁中以及用酸浸等方法，已经在实验室规模上尝试，但似乎没有出现一个有效的方法。这是一个需要迫切解决的问题。

### 锕系元素

国际上认为，核能很有可能是一个非常好的低碳能源方案，以减少全球变暖，至少在短期内认为是好的。目前在世界上大约有450座核电站，并且下一个二十年，正在使用的燃料将需要重新处理，以及其余的放射性元素将需要无害化处理。锕系元素是具有放射性的元素，为周期表中从锕元素到镅元素，并且天然存在于自然界的数量非常小。这些元素通过在核反

应堆中  $^{238}\text{U}$  俘获中子而产生，因此回收铀是很重要的，并且为了实现这一点，有必要分离锕系元素，尤其是从铀矿中分离钚元素。分离可以通过普雷克斯过程（钚与磷酸三丁酯的液-液萃取）来实现，但是该方法需要大体积的溶液。由于锕系元素具有非常相似的反应活性，分离是相当困难的。熔盐电化学反应正在被研究作为分离的另一途径。重要的是开发更好的方法，以提高核电站的安全性，可靠性和经济可行性。

## 磷

磷在工业上的应用非常广泛，从精细化学品的合成，到冶金和涂料。最重要的是，磷是生命所必需的。全球每年对磷的需求约 20 万吨，并以每年约 2.5% 的速度增长。以这样的速度增长的话，预计未来 50~150 年之内磷的需求将发生短缺。磷，大部分用于农业，其中约 90% 的矿物磷用于生产化肥。这些肥料很多会被流失，最终导致海洋环境的富营养化。因此，应投入更多的研究致力于磷肥的更有效使用和应用。

磷储量的损耗，以及由于采矿和农业流失引起的环境损害，必须通过多方面的办法来解决。需要新的沉降和分离技术有效去除城市污水和回收磷。目前从矿石回收磷的提炼技术只有 40% 的回收率，这必须加以改进。最后，还需要可持续的农业和粮食系统，以减少磷的流失，提高富含磷的植物和动物废物的回收和再利用。如果不解决这些问题，可能产生可怕的后果。

## 铟

铟是一种质地柔软的金属，在锌，铅，锡矿石中，有较低浓度的存在，并且被认为是一种非常罕见的元素。铟的主要用途是铟锡氧化物薄涂层，约占 84% 的全球消费量。这些涂层被用于平板设备的导电透明薄膜，如液晶显示器的透明薄膜。每个装置中使用铟的量通常是很小的；智能手机可能只包含几毫克，而一个大的显示器可能也就包含几百毫克。这些设备生产的数量庞大，铟的全球产量在 2011 年是 640 吨<sup>7</sup>。铟不会高浓度的聚集，它的供应很大程度上依赖于锌的生产，在生产锌时，它被作为副产物而除去。铟的供应是相当缺乏弹性的，而且目前没有能力去增加铟的产量，虽然原则上提高效率，以及进一步精炼锌的废物流可能会增加产量，但这将是一个资本密集型的过 程<sup>8</sup>。该过程中常用的铟钛氧化物薄膜的效率非常低，大约使用中 70% 的铟被浪费。因此，消费前的废料循环高度发达和被广泛实践。消费后的回收是没有任何意义的，在垃圾填埋场中铟的数量是很大的。因为铟在其使用的设备中是非常小的数量，需要大量的研究实现其高效的消费后回收。石墨烯可以作为导电膜中铟锡氧化物的替代品，以及改良的有机发光二极管的发展有可能减少铟的需求。

## 镝

镝是稀土元素，并被广泛认为对清洁能源技术是至关重要的。镝的一个主要应用是在高性能的永久磁体中，其中镝可增加磁体抵抗消磁的能力，尤其是在高温下，作用更明显。有许多方法减少镝的含量，其中之一是降低操作温度<sup>8</sup>。在保证体积和重量都不变化的稳定应用中，这似乎是相当简单的，但在移动设备应用中实现这一过程，是一项艰巨的挑战。正如本文前面所述，在许多应用中，并不需要开发和稀土磁铁一样好的替代，仅需要开发由地球上丰富的元素构成的有效替代即可。实现有效磁铁回收的工作正在进行中，但稳健的财政和政策的支持是必要的。

## 氦

氦是一个原子，惰性元素，是稀有气体中最轻的。它最广泛的，众所周知的用途，就是被用作填充气球和飞艇的气体，但是从体积上来说，这是一个相当小的应用。氦气的最大的用途是制造低温，特别是在医学磁共振成像(MRI)，以及需要低温超导磁体的其他应用方面。虽然氦是宇宙中的第二个最丰富的元素，但它在地球上相当罕见，因为在外界环境温度下，氦气会快速逃逸，这意味着，当氦气释放到大气中，它将快速逃逸到太空中。氦主要由地球上的铀和钍的放射性衰变而产生，并且在天然气中存在。在短期内，预计氦气将供不应求，但改进的设施正在发展，以便在天然气生产过程中捕获氦以及利用现场回收技术捕获氦，来满足大型和小型使用。在短期内，氦紧张是一个必然会出现的问题，并可能维持很长时间。

## 结论

过去几十年来，我们目睹了技术的显著进步，这些技术已广泛应用在科学，医学，制造业，并最终应用在消费产品上。特别地，电脑和信息技术已经成为现代社会如此重要的部分，这些设备可用性的破坏将产生深远的影响。对消费类电子产品，高效率的可替代能源系统，以及特殊材料等需求的快速增长导致了经济活动的蓬勃发展。但是这种技术大部分严重依赖化学元素，要么是非常稀少的元素，要么是难以取得的元素，而且以目前的实践来看是不可持续的。其他元素，例如磷和锂，都相当丰富，但消耗率或预期的消耗率是非常迅速的，而且这些重要材料，目前没有被有效的保护或恢复。

面对这些挑战，将有助于寻找机制来培养研究人员（尤其是初级研究人员）的技能，这些技能有利于开发能源材料和非传统的催化剂，制定教学方法来降低获取这个新专业知识的关卡。这些研究领域的支持还应该包括激励机制，鼓励研究生和年轻科学家走向这些重要领域。由于大型仪器的多功能性，如表征催化剂，磁铁，超导等材料的回旋加速器，带来更多



的国家和国际研究人员到庞大的用户设施中，将是大有裨益的。学术研究人员和最终使用者（例如化学和制药工业）之间的新线，用以定义重要的竞争前目标和元素替代的机会应予以鼓励。最后，国际合作，交流和研究人员交流，促进元素的有效使用，并作为全球性的问题加以关注。

迫切需要全面的，协调的行动解决重要元素枯竭的问题。这个问题是全球性的，因此需要来自政府，工业界和学术界的共同合作，开拓新的科技发展的方法，要考虑能源成本，环境影响，以及所需的化学元素的完整使用周期。清晰的，合理的公共政策和法规，公共和私人支持的研究和教育，以及在产业界和学术界竞争前的合作可以促进实现可持续发展的巨大进步。这些问题并非无法解决，但不采取行动的后果可能是非常严重的。

人们很容易懈怠，而不去发现新的储备或在期限内发现替代技术，因为我们都习惯了。尽管新的矿产储量可能被发现和新的技术被发现，但花费精力和努力去开发这些的成本很可能让人望而却步。虽然我们将继续学习，发现和发明新技术，但我们生活在一个有限的地球上，拥有有限的资源，而且我们生活的这个星球，不能支持人类社会的大肆掠夺。解决方案在我们的掌握之中，一个现代化的，先进的社会才可能是可持续的，但要做到这一点，需要公众意识和政治意愿。

## 挑战与建议

### 科学挑战

#### 能源材料方面

蓄电池：重要元素量的减少（如钴元素的减少）；提高使用寿命；对锂离子电池，采取回收和再利用的策略。

为使用大量丰富元素构成的太阳能电池开发新材料。

发展磁性材料中稀土元素的有效利用方法，最终以较丰富的元素取代稀土元素。

开发实用液氮温度的超导体和提高热电装置的效率。

燃料电池：开发较少依赖稀土元素的固体氧化物燃料电池和开发较少依赖铂系金属的聚合物电解质燃料电池。

#### 催化剂

提高稀有金属和重要金属元素催化剂的性能。

发展由广泛存在的元素制成的催化剂（这些催化剂的效率不高或不能被回收）。

改善广泛存在的元素制成的催化剂（这些催化剂在短时间内容易失活）的稳定性，。

发展可自我修复的催化剂，这些催化剂可再生，因此可持续更长的时间。

### **回收，再利用和循环利用**

把整个生命周期合并为新产品的设计和制造过程，并考虑组成元素的影响。

在电子消费产品中使用的重要元素，如铟元素，采用回收和再利用的战略。

为稀土元素（如磁铁中使用的镝元素）开发回收和再利用策略。

提高磷元素开采和加工的效率，增加含有磷肥料的使用效率，并开发沉降和分离技术用于城市污水中回收磷。

开发系统捕捉天然气生产中的氦气，并通过循环捕捉氦气。

开发分离技术用于锕系元素，使回收铀成为可能。

### **更广泛的挑战**

鼓励行业间，学术界和国家研究机构等的竞争和合作。

调动国家和国际研究人员到功能强大，检测仪器先进的大型中央设施中研究。

寻找支持和鼓励科研人员投入到这些领域的机制，并为学生制定相应的教学方法。

## **参考文献**

1. McGroarty, D. Wall Street Journal. 31/1/13
2. Critical Materials Strategy, 2011, U.S. Department of Energy
3. Halada, Katagiri. Proc. of EcoBalance 2010, pg 609
4. a) Materials critical to the energy industry: An introduction, 2011, University of Augsburg. b) Energy Critical Elements: Securing Materials for Emerging Technologies, 2011, American Physical Society Panel on Public affairs.
5. Catalytic Chemistry Workshop on Defining Critical Directions for the Future. Supported by the National Science Foundation, 2011.
6. Recycling critical raw materials from waste electronic equipment. Commissioned by the North Rhine-Westphalia State Agency for Nature, Environment and Consumer Protection. 2012
7. Nakajima, K., Yokoyama, K., Nakano, K., Nagasaka, T. Materials Transactions, vol. 48, No. 9 (2009) pg 2365
8. Mineral Commodity Summaries, 2012, U.S. Geological Survey

## Delegates

### China

*Prof. Qi-Lin Zhou*

State Key Laboratory of Elemento-organic Chemistry, Nankai University

*Prof. Lin Zhuang*

Department of Chemistry, Fuel Cell and Electrocatalysis Laboratory, Wuhan University

*Prof. Sanzhong Luo*

SCAS Key Laboratory of Molecular Recognition and Function, Institute of Chemistry, Chinese Academy of Sciences

*Prof. Zhigang Shuai*

Department of Chemistry, Tsinghua University

### Germany

*Prof. Barbara Albert*

Technische Universität Darmstadt

*Prof. Armin Reller*

Department of Physics, Chair of Resource Strategy, University of Augsburg

*Prof. Michael Fröba*

Institute of Inorganic and Applied Chemistry, University of Hamburg

*Prof. Claudia Felser*

Director, Max Planck Institute for Chemical Physics of Solids, Dresden

*Prof. Dr. Oliver Gutfleisch*

Technische Universität Darmstadt

*Prof. Mika Lindén*

Director, Institute of Inorganic Chemistry II, University of Ulm, Germany

*Dr. Markus Behnke*

German Research Foundation, Chemistry Group

*Dr. Hans-Georg Weinig*

Education and Science, Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh)

### United Kingdom

*Prof. Graham Hutchings*

School of Chemistry, Cardiff University

*Dr. Stephen Thomas*

School of Chemistry, University of Edinburgh

*Dr. Erwin Reisner*

Department of Chemistry, University of Cambridge

*Prof. Derek Fray*

Department of Materials Science and Metallurgy, University of Cambridge

*Prof. Peter Tasker*

School of Chemistry, University of Edinburgh

*Prof. John Irvine*

School of Chemistry, University of St. Andrews

*Dr. Clair Higllett*

Physical Sciences Manager, The Engineering and Physical Sciences Research Council

*Dr. Alisa Becker*

Programme Manager, Physical Sciences, Royal Society of Chemistry

*Dr. Deirdre Black*

Senior Programme Manager, Physical Science, Royal Society of Chemistry

## **United States**

*Prof. John Arnold*

Department of Chemistry, University of California, Berkeley

*Prof. Paul Chirik*

Department of Chemistry, Princeton University

*Prof. Susannah Scott*

Department of Chemical Engineering, University of California, Santa Barbara

*Dr. Amy Prieto*

Department of Chemistry, Colorado State University

*Prof. Karen Goldberg*

Department of Chemistry, University of Washington

*Dr. Martin Mulvihill*

Executive Director, Berkeley Center for Green Chemistry, University of California, Berkeley

*Dr. Timm Patten*

Program Director, National Science Foundation

*Dr. Bradley Miller*

Director, Office of International Activities, American Chemical Society

*Dr. Steven Mayers*

Manager, Office of International Activities, American Chemical Society

## Japan

*Prof. Hiroshi Kitagawa*

Division of Chemistry, Graduate School of Science, Kyoto University

*Dr. Tomohiro Nakayama*

Director, Department of Innovation, Japan Science and Technology Agency

*Dr. Kohmei Halada*

Senior Invited Scientist (Strategic Advanced Materials), National Institute for Materials Science

*Mr. Yasutoshi Jagawa*

Project General Manager, Battery Research Division, Toyota Motor Corporation

*Prof. Kyoko Nozaki*

Department of Chemistry and Biotechnology, Graduate School of Engineering,  
The University of Tokyo

*Prof. Mitsuo Sawamoto*

Department of Polymer Chemistry, Graduate School of Engineering, Kyoto University

*Prof. Mitsuhiro Shionoya*

Department of Chemistry, Graduate School of Science, The University of Tokyo

*Mr. Toshiki Nagano*

Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency

*Mr. Mitsuhiro Nemoto*

Director, Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency

*Mr. Nobuyuki Kawashima*

Executive Director and Secretary General, The Chemical Society of Japan