实现经济脱碳社会的蓄热发电及旋转发热机

邓隐北，戴向阳，董宝靓，蔡剑芳

浙江宝能电源有限公司

1 脱碳化蓄热发电

1.1 针对脱碳化的热衷研究

全球都在力求实现脱碳化社会，迄至数年前，由可再生能源（风电、光伏发电等）的引入实现脱碳化，已成为发达国家的责任和义务；而发展中国家致力于发展经济，对昂贵的可再生能源持消极态度，似乎兴趣不高。但是今天，随着可再生能源的成本不断下降，发展中国家反而选择了将可再生能源作为主要能源，不过应满足经常变化的负荷要求供电，还有成本，这些都是必须研究解决的课题。

再一个可成为脱碳能源的是原子能，其发电成本的大部分为设备费，正常的运转费用并不高。与此相应，可将负荷的变化由需求响应 (demand respons，DR) 等进行供需调正。因能不引入新规格设备，费用也是经济的。但 DR 的非线性扫描引起的几何失真 (packing) 及通讯障碍，恐导致不动作，故大量引用 DR 时，必须准备备用电源。相反，或许会使得电力成本高涨。

其它由于在连接范围广的情况下应加强输电线路，还要考虑运行的平稳化。输电线路的加强就意味着成本高，加之无风的夜晚等，即使传输电线再加强，发电量仍然会出现不足的状况。

经济的大量引入脱碳电源，并创造出运用的实际业绩，这是确保世界能源市场的重要、必要条件。可再生能源和原子能的技术开发，不仅旨在实现脱碳化，而且也是确保世界能源市场稳定的这一主要目标。

1.2 利用可再生能源剩余电力的蓄热发电

如上所述，为实现符合要求的供电，必须有蓄能。蓄能技术有多种类型和样式，有化学蓄能和物理蓄能，包括电蓄能、热蓄能、氢蓄能、磁储能、压缩空气储能、抽水蓄能等等。众多蓄能技术中，热储能技术作为一种能量高密度化、转换高效率化、应用低成本化的大规模储能方式，将在构建清洁、低碳、安全高效能源系统中，构建以新能源为主体的新型电力系统中，以及保障电力系统安全稳定运行等方面，发挥重要的作用，是未来规模储能的中坚力量，具有广润的发展前景。

图 1 所示为典型的蓄热发电结构。

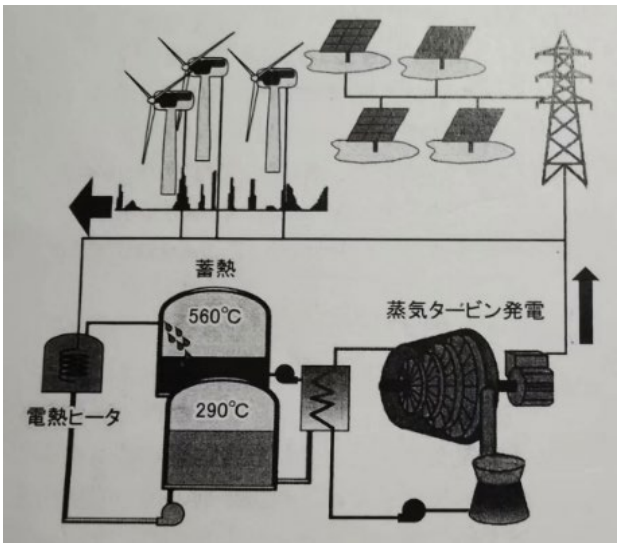


图 1：蓄热发电的简单结构

从可再生能源（风电、光伏发电等）发出的电力（通常是利用负荷低谷时的剩余电力），通过加热器转变成热，经过热媒介的输送，将这一热能在蓄热材料中储存起来。在需要的时候，再从热媒介中取出，制成高压蒸汽，驱动透平（汽输机）发电。图 1 中的蓄热设备为硝酸盐 2 罐式。作为太阳热发电的重要技术，已有 10 年的运行业绩，是已商业化的技术。运载热的热媒介以及蓄热材料均为硝酸盐。所用的硝酸盐，也可用于肥料，既安全又廉价。该系统近年来，在中国、摩洛哥 (Morocco) 等，均多数结合光伏发电一起配套建设。像博茨瓦纳也计划建设这一蓄热发电系统，诸如此类太阳热发电建设中，由于技术的日趋成熟导致了发电成本的逐年下降。旨在进一步的低成本化、高性能化的各种开发正在进行着。

这一蓄热方式的发电效率，取决于卡诺 (carrnot) 效率（也即卡诺有效利用系数），按照温度区的要求也未超过

40%，一半以上的能量未利用而被舍弃。这一舍弃的能量实在是浪费可惜。蓄热发电以前有过，但现实中尚未真正开发。不过，其设备成本低，迄今，相应于蓄电池储能领域还是经济的。因此，由世界电力公司主导开发的，及由制造厂商开发的，仅了解清楚后确定的就有数十项在进行。Azelio 公司和 1414degrees 公司率先，利因布雷敦循环 (Brayton cycle) 的 Malta 公司和合并使用液态空气储存的 High view 公司等，相继开发此类蓄热工程。Malta 公司和 High view 公司采取了与图 1 有相当差异的系统结构，充放电效率可超过 50%，已得到认可。住友重机械工业公司还出资支持了 High view 公司。

1.3 可再生能源与原子能的相互协调

第四代原子炉的 Small Module Reactor(小模式反应堆，SMR) 中，附带蓄热系统已有很多提案。通过附带蓄热，一方面保持原子炉的功率恒定，一方面可相应于负荷变动而供电，能实现经济运行。将热原封不动储存起来，故比抽水蓄能更合理。由于增设了图 1 中的电热转换器，可再生能源与原子能发电可相互协调，且蓄热设备能共用，预计将更加经济。

2 蓄热发电的经济性

在本节，对蓄热发电相对的、绝对的经济性进行评价。作为比较对象，选择了铅酸电池和锂离子电池的蓄电系统。其它蓄能技术比如抽水蓄能，新建的难度大，起始成本高；又如压缩空气蓄能，也是同样的理由，不宜列为比较对象，至于氢蓄能，因未做过系统级的试验，也难于进行经济性的评估与对此。

于是，在对经济性进行评价时，为了简便，将太阳光发电 (PV) 的电力用于夜间使用时的成本作为指标。这种场合下的夜间电力成本，按下面公式表述：

$$\text{电力成本} = \frac{\text{充电费}}{\text{效率}} + \frac{\text{设备费}}{\text{寿命}}$$

充电费为 PV 发电的成本；效率为蓄能设备的受电端 / 送电端的效率。维护费和利息等也有影响，这里已省略。上式中将充电费作为变数，用图形表示如图 2 所示。计算用的数值列于表 1。蓄电池的单电池 (Cell) 成本更便宜，但作为系统用设备时，各种各样的附属设备都归纳于这一成本内。

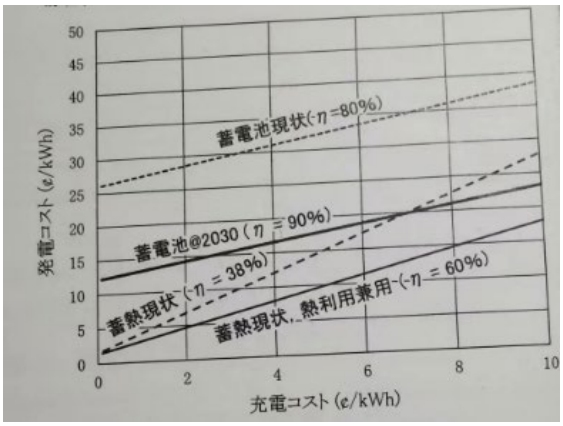


图 2：PV 电力夜间利用时的发电成本

表 1：计算用数值

表1 計算に用いた数値

	鉛蓄電池	蓄熱発電
kWh コスト	600 $ (現状) 300 $ (2030)	20 $
寿　命	3,000	10,000
効　率	80 or 90%	38%

蓄热发电每度电 (Kwh) 单价便宜，而且寿命长，可再生能源充电费越下降，越显示出蓄热发电的优势。但是，效率比蓄电池的低，涉及充电成本的提高是不利的。虽然如此，但可再生能源的发电成本，正普遍下降到 10₵/kwh 以下，在这一图表范围内，蓄热发电比现状的蓄电池可以说还是经济的（₵- 哥斯达黎加萨、萨尔瓦多的货币单位，科郎；$- 美元)。

已有预测，到 2030 年蓄电池的成本将下降到现状成本的一半，那时的成本如果降到 7₵/kwh 以下，蓄热发电方案仍然有利。到 2030 年可再生能源的发电成本进一步的不断降低，加上采用 PV 电力的夜间利用 (充分利用了峰谷电价之差的利润)，不言而喻，蓄热发电是最经济的。

蓄热发电，利用热机产生大量的废热，这一热量适应于数十度到数百度热利用的温度区，此时的效率为 60~80%。这种情况下，即使蓄电池的成本下降了，蓄热发电也比蓄电池优越。而且，又有热电转换效率超过 50% 的开发实例，就不利用热机的废余热，也比蓄电池经济。

其次，考虑到作为发电成本绝对值是否为社会所容许的成本，假定可再生能源的发电成本为 5₵/kwh，按图 2 的蓄热发电成本则为 5₵/kwh。8 小时对蓄热发电的

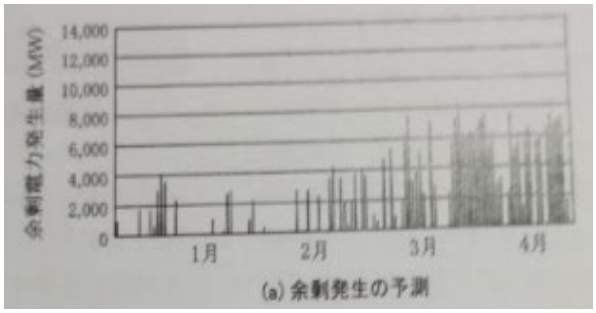
充电和对用户的供电并列进行，剩余的 16 小時从蓄热发电供电时，简单平均为 12₵/kwh。这与以往由化石燃料的发电成本持平。如果可再生能源的发电成本削减 40% 的 3₵/kwh，即简单平均的蓄热成本为削减 33% 的 8₵/kwh。2019 年时期，世界风力发电实际平均为 5.3₵/kwh，PV 发电成本低于合同的基准值，且下降趋势未停止。可以说，由蓄热发电和可再生能源实现经济而又稳定供电的时代已经临近。

3 利用剩余电力时的经济性

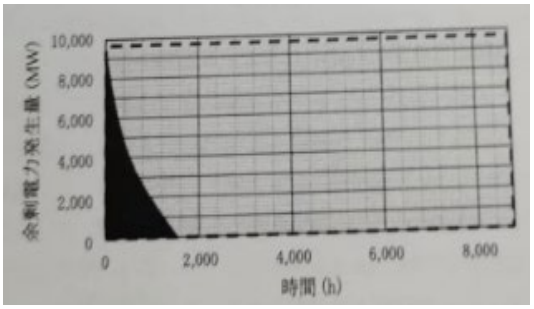
3.1 硝酸盐型蓄热发电的经济性

上节对 PV 电力夜间利用的经济性已经叙述，也讨论了 100% 脱碳电源的時代背景和预测，但到达 100% 脱碳电源其时尚远，到那时需要新增其它的设备并进行改进和运用，也要求具有经济性。下面，对这些进行了研讨。

作为经济性的研究模型，选择了将可再生能源剩余电力，实现廉价受电、蓄热与发电。具体来说，包括日本地区在内，对产生的剩余电力进行预测，按照运输送料的程度进行采购。在蓄热发电的情况下，例如剩余电力的时间及其发电量预测结果，如图 3(a) 所示，图中仅显示 1 年的一部分，1 年间制余电力发生量的变化曲线如图 3(b) 所示。



（a）剩余电力发生的预测



（b）延续期间的变化曲线

图 3：可再生能源电力的预测

取决于设定的地区不同，上述研究事例 (case-study) 的结果，估计为 11 日元 /kwh 左右。通过这一试算过程得知，为采用剩余电力的加热器 (heater) 容量是难于设定的。假设，将剩余电力的最大发生量相加，设定加热器的容量，图 3(b) 点线四角的面积则为输入的电量 kwh；另方面实际输入的 kwh 仅为左下角的三角形面积。也即，1 年之间几乎大部分设备不工作，只有很低的设备利用率。因此，为追求经济性，必须彻底降低电热变换器的成本。

这一情况，从另一截面图 (图 4) 也展示出来。100MW 的蓄热发电站中，利用剩余电力进行蓄热运用，其大部分设备为电热转换器。电热转换比热电转换，每 KW 的单价便宜，容量增大则成本提高。

图 4：利用剩余电力的蓄热发电设备图

这里，设定的电热变换器为硝酸盐发热器，硝酸盐发热器一般是采用 400V 电压驱动，对吸收 MW 级的大功率则形成大电流。这样，必须添加母线 (汇流排 bus bar) 这类设备；伴随着大功率的通 / 断操作，还应采用防噪音、防闪烁 (flicker) 设施。因此，每 KW 的实际价格约为 2~5 万日元 /KW。而且，对于这一电热转换的加热器，并未显示热机大规模化的效果 (也即，无尺度优势 Scale merit)。作为热机的经验规则，容量增大，其成本按 70% 的比例增加。越是大型化，电热变换部所占的比例也会增大。既然如此，电热变换部的规格就不宜过大，例如，西门子 Gamesa 公司 130MW 级的主控设备 (pilot plant) 中，电热变换部的尺寸小，在达到完全蓄热的 24 小时左右或更长些时，因规格小，单位体积所消耗的功率则小。如下所述，采用空气加热器时，这也是电热变换部力求小型化的原因。

3.2 碎石 / 空气型蓄热发电的可能性

采用硝酸盐的加热器，主流是低压的 400V 驱动，相

应与此，市售用的空气加热器，是由更高的电压驱动的。取消了变压器和汇流排，可望降低成本。此外，用硝酸监热媒介时，为防止热媒介的化学分解，应对加热器的发热面设置温度上限，而用空气热媒介时，其限制可延缓，传热面积能缩小。因此，没有图 1 所示的硝酸盐 2 罐式，而以碎石作为蓄热材料，将空气作为热媒介的，被称作热润磨 (therm-grin) 的蓄热方式。这种蓄热方式的开发实例正在增加。

但是，与硝酸盐 2 罐式相比，储能密度低，设置面积大，而且，因蓄热期间在蓄能罐内的热量均匀化而不能长时间的蓄热。

硝酸盐 2 罐式的放热为 1% 以下，适合于达到 2 周时间左右的供需调整；而碎石 / 空气蓄热方式，估计仅 2 天左右的调整时间。

另外，蓄电池系统场合下，不像蓄热发电那样，可从系统分别设计充电部分与放电部分，且设备的利用率低导致高成本化。蓄电池系统是一种棘手的利用方法。

蓄热发电具有火力发电的组成结构，近似于承担基础负荷的电源。现状是，与分别供电基荷、中间负荷、尖峰负荷一样，蓄能也应分别采用各种不同型式。

4 旋转发热机

4.1 旋转发热机的优点

不论是空气式加热器还是硝酸盐式加热器，均无规模优势，由成熟技术实现划时代低成本化的可能性低。使这一电热变换部能达到低成本化的是旋转发热器。如图 5 所示，原理很简单，先从电动机的磁场 (电励磁或永久磁体) 入手，在导体的近傍使磁场旋转，这与家用 1H(松下公司) 的料理机原理相同。图 5 中的发热面为平板，但实际上是呈圆筒状。

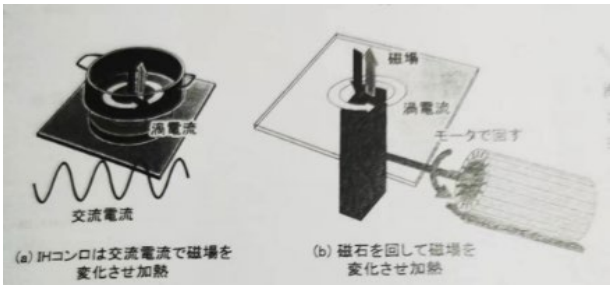


图 5: 旋转发热机的基本原理

预计这一旋转发热机能实现廉价，理由如下：首先电动机与发电机结构相同，通过运转控制，哪种用途均能适用。同步电机也好，异步电机也好，都一样。同步电机场合下，按照 300MW 级蒸汽火电的建设费为 7 万日元 / KW，通过优化可降到 1 万日元 / KW 以下；异步电机场合下，每 KW 的单价更便宜，但这类大型异步电机比较少见。发热部比发电机结构要简单得多，旋转发热机的发热部成本，仅为电动机成本的几分之一。

旋转发热机的电动机可与高压系统连接，其间不需要变压器。由励磁电流的大小可控制电 / 热的转换量；也勿需使用吸收电力的设备，故可小型化。而且热媒介与发热面的相对速度能够很高，又可高效率的导热。对比通常的加热器可望大幅度实现小型化。此外，旋转发热机因具有惯性力，今后在增加逆变电源、逆变负荷的环境下，有利于电力系统的稳定性。加之，由于具有事故电流供给能力，已有的事故评定系统仍能适用，当发生雷击等事故时，系统可迅速回复。还具有蒸汽透平发电部分的这一功能，从图 4 可知旋转发热机的容量有压倒性增大的潜力。

4.2 旋转发热机存在的研究课题

空气热媒介与液体热媒介之间存在着若干差异，作为研讨的项目，例如，磁场与发热部的热绝缘；与热媒介的热交换效率；以及轴的密封、轴承的耐热性等。作为有希望的结构，如载重车辆辅助制动的减速器 (restarder)、防水型 (canned) 电动机、以及电感线圈的应用等。

关于蓄热发电，在日本是相当滞后的，但由于旋转发热机的开发而得以迅速进展。尤其在目前的事例研究中，主要由可再生能源的发电成本影响到最终稳定的发电成本，以及海外类似的实现低成本化事例，未来，对设备成本的影响也会愈益增大。

5 与氢系统的融合

在国外，1.35₵/kwh 的合同电价已有报导，可再生能源的发电成本明显下降。此时，从外界绿色 (环保) 氢的输入正进入人们的视野。例如，已引入 1₵/kwh 发电成本的区域性蓄热发电。一天中 40% 时间从可再生能源的发电投入电力到水电解装置和蓄热发电上。一般，可再生能源发电成本低廉的地区，设备的利用率高，40% 可认为

下转152页