

军的克劳德克罗夫特电光试验设备研制一种高能多模 Q 调制激光器。科拉德公司在密西根大学的合同下,作为它远景研究计划局密西根计划的一部分,研制一种激光监视系

统,在夏威夷的毛依岛哈里卡拉天文台跟踪人造卫星。

译自 Miller B., *AW&ST.*, 1967 (Aug. 21), 87, №8, 92~106

磁流体发电的现状 & 远景

1. 能源和磁流体发电

近年来,随着经济的迅速发展和科学技术的进步,工业生产的增长特别显著,伴随而来的能量的消耗,显著增加。这样,能量的需要就成了人们集中关心的重大问题。

为了落实新的能源,必须认真开发原子能。特别是为了遥远的将来,还需要进行核聚变产生新能源的基本研究。

为了更有效地利用能源,人们提出和研究了各种能量转化方法。现在消耗的总能量,大约有 40% 是由电力供给的,这个比率还在逐渐增加。因而,为了有效地利用能源,必须研讨大电力的高效率转换。根据这个理由,由能源到电力的各种直接变换中,磁流体发电在大规模的装置中,被认为是优越的。在供能问题严重的日、英等国,目前发展了这种比较大型的装置,研究了把它作为火力发电的涡轮机在实用化上的可能性。现在为了宇宙飞船应用等的特殊目的,正在活跃的开展磁流体发电以外的能量直接变换方法。

另一方面,对于磁流体动力发电在原子能发电的应用上,进行了积极的研究,这是因为在磁流体发电的使用上,比起原子能发电的电力单价有显著的改善。但是,目前高温气体冷却炉仍处于探索阶段,可以预料,原子反应堆和磁流体发电的组合比火力和磁流体发电的组合要迟得多。

磁流体发电和已有的火力发电组合的循环,因为是把由磁流体发电部分排出的高温燃烧气体导入火力发电的汽锅,所以称为磁流体涡轮机火力发电。根据新的说法,火力发电的热效率大约为 40%,在它的操作温度时,卡诺循环的热效率大约是 67%。磁流体涡轮机火力发电的特征之一,是磁流体发电根本没有旋转部件,因为操作温度高达 2,200~2,500°C,卡诺循环的热效率将高达 0.85 左右,估计磁流体涡轮机火力发电的热效率可以达到 53~57%。

2. 磁流体发电概要

磁流体(电磁流体动力学)发电的原理与已有的发电机相同,根据法拉第定则,当导体沿切割磁场的磁力线方向运动时,在与导体的运动方向及磁场方向相垂直的方向上,产生电动势。只是发电机使用铜等固态导体,而在磁流体发电中,使用导电性的气体,即高速等离子体。因而在原理上不是什么新东西。等离子体和磁场的作用方式和已有的发电机相同,所以,在发电上可以是直流的,也可以是交流的。目前,从实用的观点出发以及其它的原因,主要的研究对象是由恒定磁场引起的直流发电。

如上所述,磁流体发电运用的流体是导电性的流体。到目前为止,在应用的场合,主要研究的是气体。为了使气体具有导电性,

需要高温。为进一步提高气体的导电性,要加入所谓添加物质的K和Cs等碱金属物质(称它们为种子)。用化石燃料加热时的气体是燃烧气体,用原子反应堆加热时,要用He或Ar。还可以考虑使用其它熔融金属的方法。

使用气体时磁流体发电的基本循环与燃气轮机相同,都是布雷顿(Brayton)循环,特别是火力用磁流体发电循环类似于燃气轮机的蒸汽复合循环。如图1所示,在使用燃

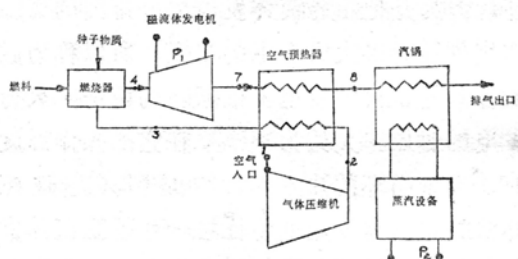


图1 开放型(火力)循环。

烧气体的情形下,在交换器中先将空气预热到 $900\sim 1,100^{\circ}\text{C}$,然后必须把氧加入化石燃料,使之燃烧,成为 $2,400\sim 2,500^{\circ}\text{C}$ 的燃烧气体,从而制成以K等为种子的几个大气压的气体。把此种以 $1,000\sim 2,000$ 米/秒高速膨胀的导电性气体放在磁流体的发电部分。在发电回路上,用磁场的体积力代替涡轮机的工作,主要依靠焓的减少,变换为电能。在发电回路中排除的气体,还有 $2,000^{\circ}\text{C}$ 左右的高温,因此可用它预热燃烧用的空气,用蒸汽设备把它们放到大气中。这样的循环是开放型的,使用燃烧气体的循环几乎都是开放型的。图2表示的是封闭型的情形,在那里把原子反应堆作为热源。这种原子能用的磁流体发电,使用He或Ar等单原子分子气体,预热后,把原子反应堆加热到 $1,500\sim 1,700^{\circ}\text{K}$,然后,用Cs或K作为种子,送入磁流体发电部分。发电回路的组成是:感应电场使电子温度上升,根据非平衡

电离法,导电性好的高速气体发电,然后气体到热交换器和蒸汽设备,回到压缩机;同一种流体再进行下一次循环。

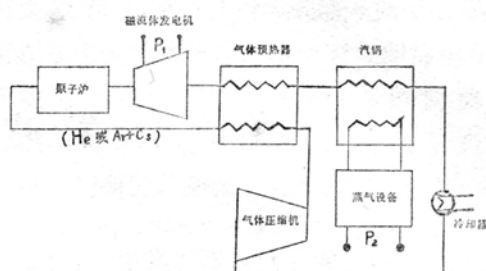


图2 密封型(原子能用)循环。

磁流体涡轮机发电的理论循环T-S图,如图3所示。这个图上的各点的状态,是关于图1所示的开放型循环的。循环的最高温度是 T_4 ,燃烧或原子炉的热量取 Q_1 ,磁流体发

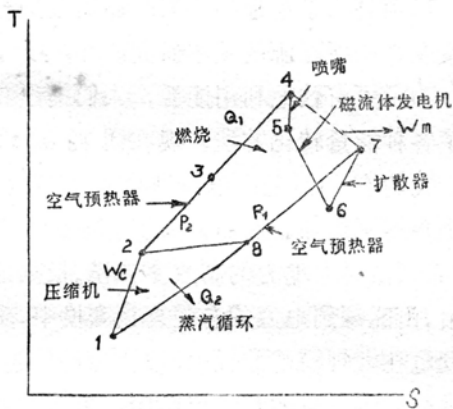


图3 磁流体发电的T-S图。

电做功为 W_M ,从8到1状态失去热量 Q_2 ,转换给蒸汽循环。蒸汽循环由涡轮机做功 W_t ,复水器失去 Q_3 的热量。如果 W_c 是压缩机的功,则这种组合循环的全部理论热效率 $\eta_{\text{总}}$ 为

$$\begin{aligned} \eta_{\text{总}} &= \frac{(W_M - W_c) + W_t}{Q_1} \\ &= \frac{W_M - W_c}{Q_1} + \frac{W_t}{Q_2} \cdot \frac{Q_2}{Q_1} \\ &= \eta_M + (1 - \eta_M) \eta_R, \end{aligned} \quad (1)$$

式中： η_M 是磁流体循环的热效率， η_R 是蒸汽循环的理论热效率。显然，可以期望的总热效率的提高 η_M 为 50~60%。实际的循环必须考虑磁流体发电机的断热效率 η_g ，压缩机的效率，空气预热器的温度效率以及蒸汽循环的损失。取发电部分的电场强度为 E ，流速为 U ，磁通密度为 B ，则负载率 $K = E/UB$ 。根据外界负载的比率变化，在发电部分流速是一定的情形下，如果用 η_g' 表示图 3 的 5 到 6 的热梯度和断热梯度的比，则 η_g' 近似为

$$\eta_g' = [1 - (T_6/T_5)] [1 - (T_6/T_5)^{\frac{1}{K}}] \simeq K. \quad (2)$$

可以认为发电机的断热效率 η_g 大致等于 η_g' 。(2) 式的 K 在没有接负载时为 1，短路时为 0，最大功率密度时为 1/2。实用上，多数情况是 $K \simeq 0.8$ ，所以能够有 0.8 左右的断热效率。

磁流体发电单位体积承受的发电功率 P [兆瓦/米³]，当流体的导电率为 σ [伏/米]，速度为 U (米/秒)，磁通密度为 B [韦伯/米²] 时，最大的功率由下式给出：

$$P = \frac{C\sigma U^2 B^2}{4} \quad (3)$$

常数 C 由发电部分的构造和霍尔系数 $\omega_e \tau_e = C'B/P$ 决定。在实用上，磁流体发电的最大功率 P 可以超过 10 兆瓦/米³，有希望达到 100 兆瓦/米³。图 4 表示当 $C=1$ 时，根据 (3) 式画出的 σ 和 UB 、 P 的关系图。在亚音速范围使用时，流速为 1,000 米/秒左右，超音速时为 2,000 米/秒。磁通密度 B ，用铁心线圈时为 2~3.5 韦伯/米²。如后面所述，用超导材料作超导磁铁时为 4~6 韦伯/米²。此外， U 及 B 的范围，要根据火力用还是原子能用来决定。在火力用时，其

倾向是 U 及 B 要大， σ 尽量小，气体温度要尽量降低。另一方面，在原子能用时，如后面所述，使 B 加大有一些困难，所以考虑把 U 和 σ 加大。

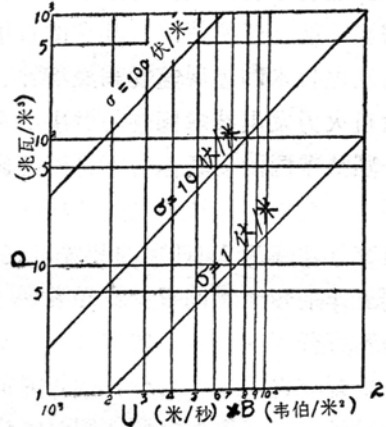


图 4 输出密度。

当导电性气体在垂直于磁场的方向运动时，由于霍尔效应，在轴向产生电压^[1]。这种霍尔效应由电子回旋频率 ω_e 与碰撞时间 τ_e 的乘积 $\omega_e \tau_e = C'B/P$ 表示。在这个公式中， B 是磁场 [韦伯/米²]， P 是压力 (大气压)，常数 C' 在用 K 作为种子的燃烧气体时为 2~3，在用 C_s 作种子的 A_r 中时，为 20~50。由于 $\omega_e \tau_e$ 的值约为 1 时，轴向的感应电压大，对于单一的电极，把这个轴向的电场短路时，输出下降，为此把电极和轴向分开，这种形式的发电机就是所谓的法拉第发电机。在 $\omega_e \tau_e$ 比 1 大的情形下，积极使用轴向感应电压的电极装置，这是霍尔发电机的优点^[1]。在具有实用规模的磁流体发电中，这两种发电机的特点是：法拉第型的端电压为几千伏，必须把各个负载接在电极之间；而霍尔型的，则以一个负载为佳，端电压为几千伏。它们之中的任何一个，是用在火力发电上好，还是用在原子能发电上好，还没有结论。

3. 火力磁流体发电

以煤、石油、天然气作燃料的火力磁流体发电，由于具有经济价值，已经进入实用发展阶段。也就是说，欧美各国把本国将来的能量需要、能量资源情况、其它的直接发电等新的发电技术的进展速度和经济性、磁流体涡轮机火力发电技术问题的解决的可能性等，分别从本国的立场进行了讨论、研究和发展的^[2]。一九六〇年使用燃烧气体的方法，开始研究了功率为 10 仟瓦的装置，到今天，在不到五年的短短时间里，已经发展了输出功率为 4 万仟瓦的装置。特别是在不久的将来，将要建设电功率 3 万仟瓦的长时间运转的小型质子型磁流体发电所。同时，由于大型超导线圈在实用化方面的发展，对这种发电最近的急速进展，将给予颇大的支援。

作为火力磁流体发电工作流体的燃烧气体等离子体材料，各国是不同的。在日本，石油是最有希望的。使用石油时，空气预热温度对气体温度和导电率 σ 的关系，如图 5 所示。在磁流体发电的发展初期，认为 $\sigma = 100$

伏/米左右是必要的，因此限制了气体温度的提高，所以多半研究导电率大的情形，为此探索了大量的氧同空气混合的所谓富氧法。但是，以后对强磁场进行的研究表明，有利用超导磁铁的可能性，所以可以期待现在的 B 取 4~6 韦伯/米²。下面研究发电回路和性能，取 U 为超音速，另外，用霍尔型发电机进行研究。例如，在(3)式中与 $P=100$ 兆瓦/米³相对应，如果 $U=1,800$ 米/秒， $B=4$ 韦伯/米²， $C_1=0.80$ 的话，则 σ 大体上最好为 10 伏/米，发电部分的静温度最好为 2,200°C 左右。取 $U=1,800$ 米/秒，总温度是 2,530°C。在几年以前，要求约 2,700~2,800°C 的总温度。今后能够作成这样大的 U 的发电部分的结构，可以想象，由于采用强磁场，在降低操作温度方面要作更多的努力。但是，这样的操作温度比以往的工业上使用的温度高，所以，有待解决如下所述的几个技术问题。

3.1 几个技术问题

(i) 空气预热器 把石油系统的燃料在理论混合比的空气中燃烧时，空气的预热温度和火焰的温度的关系，如图 5 所示，为了得到 $P=1$ 大气压，2,300°C 的燃烧气体，必须：(1)把空气预热到 900°C 以上，(2)增加空气中氧的含量。对于方法 (2)，由于从前引人注意的氧质子机器已经多了起来，现在则重视空气的预热方式。空气预热的具体方法有三种：(a)使用矿渣等耐热材料的隔离式热交换器，(b)蓄热式热交换器，(c)熔融矿渣的特殊热交换器，已经进行了一部分准备实验。对于(a)型装置，预热空气和高温气体的压力差是 4~8 个大气压，在强度上有问题，可以考虑使用燃气轮机系统循环的解决方法。对于(b)型的结构，使用矿渣基质的蓄热式交换器，在炼铁及玻璃工业的

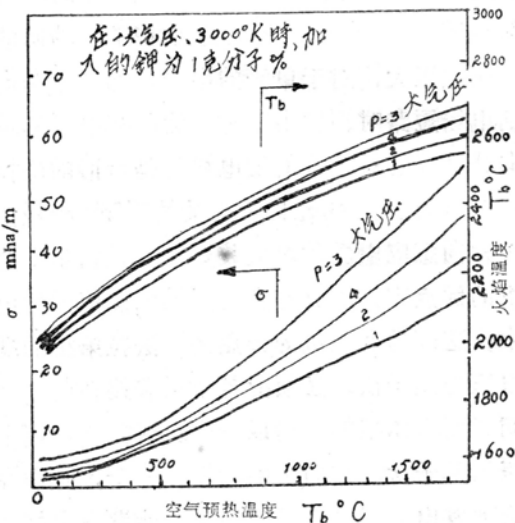


图 5 燃烧气体等离子体的导电率和气体温度。

鼓风机技术上差不多已经实现,要研究的是对种子物质的腐蚀、交换方法等技术问题,这是目前最有希望的方法。方法(c)是把液体矿渣作为热媒质,空气和气体进行热交换,未解决的有矿渣的泵浦等问题。但是这些方法在耐热方面已达目前技术的可能范围,今后要解决耐久性。

(ii)回路壁的耐热材料 磁流体发电回路壁,理想的是把电极作为电的和热的绝缘壁。为此要进行开发有耐热冲击性的矿渣耐热材料。这样要求的其它的种子物质,用硫黄腐蚀,不能完全满足耐损耗等条件,氧化镁、氧化铝、二氧化锆等都属于研究的对象。因为热壁有热的损耗,考虑使用耐久性好的水冷壁,已经能够连续运转 100 小时以上。

作为磁流体电极材料的硅长石,损耗是严重的。对于实用的机器是不适当的,正在用水冷金属,二氧化锆等矿渣进行试验。现阶段,在水冷上有耐久性良好的材料,成问题的是电极近旁电压下降,各部分电极间的霍尔电压短路等等。

(iii)种子物质的回收 因为从开始就不断的往燃烧气体添加种子物质,故在发电部分的下游回收种子物质的锅炉管道和流路的腐蚀、以及环境卫生方面,都是重要的事情,这也是磁流体发电在成为实用化以前所要解决的问题。但是到目前为止,虽然在某种程度上进行了锅炉管的腐蚀实验,而关于回收的详细实验情况,尚未获悉^[3]。

(iv)超导磁铁^[2] 磁流体发电机的磁场所用的磁铁,用常温的铜线制作时,对实用的发电机而言,励磁功率要消耗磁流体发电的输出的 10%,造成 4 韦伯/米²左右的强磁场是有困难的。但是,使用在 4.2°K 附近具有超导状态的超导线制成的空心磁极,在

功率消耗上完全可以忽略,这样就能够制成磁场为 4~6 韦伯/米²的大型线圈。美帝阿符科 (Avco) 公司试制了磁流体发电用的鞍形线圈,这种线圈的有效内径为 30 厘米,长为 3 米,已经进行了基础实验,恐怕在今年将进行试制更大型的、输出 3 万千瓦的磁流体发电机用的线圈。

3.2 各国的发展计划

对于磁流体发电回路流动的流体力学及能量的研究,在热平衡状态的假设下,详细的研究了一元的情形。这个结果和实验结果符合得很好。大型装置的性能可从理论上推出,从而能够对实用的磁流体发电机的热效率和经济性进行估计。对于几分钟以内较短时间的运转,实验测量出的磁流体发电性能已经达到几万千瓦的范围。目前,在实用化磁流体发电机方面,在必需的耐久性的研究中,重点是放在上述几个技术问题的研究上。

目前在这方面较发达的有美帝、英帝及日本。美帝从能量的资源观点出发,面对着未来能量需要的急速增长,作为对原子能发电有全面指导力的桥梁,正在解决某些技术问题,在实用上努力提供火力磁流体发电。特别是阿符科公司和西尾公司在研究上有些进展。前者由美帝电力公司提供研究经费,后者由美帝内务部煤炭研究所提供。阿符科公司在磁流体发电方面较为先进,为了实用化,目前正开展四个大的研究项目。其中第一项是对具有优良性能的大容量发电机的研究,所进行的实验有^[4]:对法拉第型,输出为 1.5 兆瓦,对圆形截面的霍尔型,输出为 0.75 兆瓦。第二项是研究供给励磁电力的磁流体发电机,也就是研究自励式的磁流体发电^[2]。第三项是几百小时及长时间的运转实验。第四项是试制产生强磁场的超导磁铁。这些研

研究成果，预定用在1968年初计划发展的电输出30兆瓦、长时间运转的磁流体涡轮机质子型发电设备上。阿符科公司作为目前实用发电机考虑的装置，总输出功率为600兆瓦，其中约60%由磁流体发电得到，其余的则由火力发电得到。它的循环表示在图6中。另外，对这种循环，已有的火力发电站的热效率为40%，如取燃烧使用的空气的预热温度为1,094°C，则磁流体涡轮机火力发电站总的热效率为53%。资金消费率是13.5%，设备利用率为80%，种子回收率是80%时，燃烧价格和发电端成本的关系，表示在图7中。将来，由于磁流体发电方面的有关技术的进展，磁流体发电的利用和发展取决于原子能发电发展的速度和电力的价格。

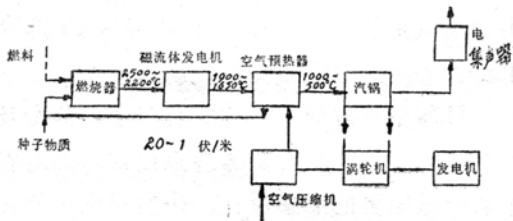


图6 阿符科公司的600兆瓦开放循环。

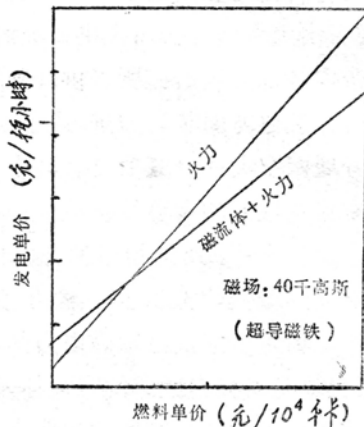


图7 燃料单价和发电单价。

英帝的火力用磁流体是以中央电力总署为中心进行发展的。目前正在建设的输出功率2万千瓦的装置，今年将开始运转。包括这台装置在内，该署几年间进行了约30亿元的研究投资。正在进行的重点研究有空气预热器、燃烧器、种子回收装置，特别是在空气预热器上投入很大的力量。英帝的方针是积极发展。日本和英帝同样都缺乏天然的能量资源，因此将来必须输入大量的能源。以此作为建立原子能发电的桥梁的意图是很强烈的。美帝火力的磁流体发电的燃料是以煤作对象，与此相对应，英帝和日本主要考虑烧煤油。

日本自从去年以来，在东芝中央研究所试制了发电装置，这是法拉第型的，最近使用超音速流的传播，给出约100千瓦的输出^[5]。此外，日立制作所进行了1小时左右约1瓦输出的耐久实验，三菱重工集团及三菱电机集团进行了约20小时的4瓦左右输出的耐久实验。日本最大规模的装置，是由工业技术院电气试验所去年试制的输出1兆瓦的实验机，最近开始实验。其次，这方面的研究在本年度已作为通产省的大型发展计划中的一个，进行发展。

4. 原子能磁流体发电

原子反应堆用的磁流体发电和火力磁流体发电，它们包含着很不相同的问题。也就是说，在热源方面具有的高温气体冷却炉还处于没有开展的阶段，在操作气体温度为1,500~2,000°K的原子反应堆的发展上，估计还要很长的时间。另外，对于这样的低温操作气体，为了进行有效的磁流体发电，非平衡电离法却处在尚未研究的阶段。在原子反应堆磁流体发电的研究上，操作气体的温度比电子的温度高，根据热平衡电离状态，

得到非常高的导电率的研究,正在美帝、欧洲主要国家及日本进行。目前,集中力量研究的是,使用发电通道内发生的感应电场 $\vec{U} \times \vec{B}$ 把电子选择的加热的现象。

目前的实验装置,是采用几乎一下子就把贮存的气体从煤气桶上放出的方法,运转时间至少有几秒钟,最大输出为几千瓦。以前理论上预言的非平衡电离特性,不是必需的。特别是在原子能的应用上所期待的大霍尔系数 $\omega_e \tau_e$ 的情形的实验结果,比预言值要低^[2]。在霍尔系数大的时候,导电率和霍尔方向的感应电场,仅达理论值的一半以下。造成这种情况的原因,正在进行研究的有:器壁附近的边界效应及其不稳定性^[6],基于发电回路的结构及电子温度和气体温度之差的电热不稳定性以及由于电磁声波而发生的磁声不稳定性。在封闭的回路上,英帝国际研究发展公司是唯一在实验上观察非平衡电离的,以 C₂ 作种子的 H₂ 作为操作气体时,气体中含有的杂质影响是大的,最近已开始得到很好的结果,其输出为 1 千瓦以下。

5. 熔融金属磁流体发电

人们最近提高了对于用熔融金属代替作为操作流体的气体磁流体发电的关心,原因是:原子反应堆的热媒质,从蒸汽或气体在高速增殖炉上转化为熔融金属的可能性提高了。但是,这方面的研究,在火力磁流体发电与前面叙述的原子反应堆用的磁流体发电相比是少的,主要是美帝在进行研究。熔融金属磁流体发电,在熔融金属的使用上有三种方法:即用它的液相、汽液二相及汽相,作为金属的主要研究 K、Na 和 K 的合金以及 Zn 等。在使用液相的场合,其导电率约为

气体的 10^4 倍,流速在气体的 1/10 以下,得到了 10^3 兆瓦/米³ 以上的输出功率密度,具有大电流,小电压的特点。使用这种液相熔融金属,在循环上的技术问题有:加速损耗小的液体的方法;为了加速热源的热能量所使用的方法等等。因此研究了汽液二相的流动循环,用汽相加速液相,在发电部分上,有使用两相的流体和把加速用的汽相分离的液相流体的方案。对于使用汽相的方法,就原子反应堆而言,是把 NaK 或 K 的过热蒸汽送到磁流体发电部分,由于非平衡电离,利用导电率高的蒸汽流体。这样,在熔融金属循环上有种种设想方案,在实验上已经开始进行的有 NaK 等小型装置。唯有使用液相的方法是得到交流发电可能的唯一途径。在理论上和实验上曾有某些尝试,人们期待着今后发展其它的熔融金属磁流体发电。

6. 结 束 语

日本在能量的开发和有效的使用方面,没有美帝存在的那些条件,却与英帝十分相似。所以在磁流体发电的发展上,必须根据各国情况具体的讨论。在磁流体发电的研究和开发上,美帝较先进,英帝的愿望是实现火力磁流体发电。而日本,虽然从今年起通产省提出了一个大型的开发计划,已经到了认真探索长远规划的时期。在原子能及熔融金属的磁流体发电上的超导磁铁,尚处在基础研究阶段。在这方面与欧美各国相比,要作更大的努力。

参 考 文 献 (略)

译自 森康夫,《动力》,1966(5~6月),№91, 24~29