

瑞典用于研究放射性废料处理藏址 地质特征的地球物理调查

O. 奥尔森 等

引 言

由核反应堆产生的强放射性废料应该储藏在相当深的地下储藏库中。为了得到一个在几十万年内使环境不受放射性废料影响的最终储藏库，就要设置几层屏障，使放射性核素的迁移量达到最小。屏障包括燃料物质本身、金属罐、缓冲物质和储藏库周围的基岩。就此而

言，放射性核素通过基岩的迁移取决于地下水的流动和裂隙矿物对放射性核素的吸附作用。基岩的性质也很重要，因为它们能影响其它屏障的作用，例如铜罐的腐蚀取决于地下水的化学性质。

在瑞典的几个不同地点，主要是在片麻岩或花岗岩地区，进行了综合调查。其目的是确定每个地点的地质和水文条件，并且取得对深约 500 米的储藏库进行安全分析所必要的现场特征数据。

对某现场的调查是按严密的地质、地球物理和水文综合计划进行的。其主要目的是查清保证最终储藏库安全的主要因素。因此，重点放在查清地下水的流动状况。在结晶岩中，大部分地下水在裂隙带内流动。因而，在确定断裂带的位置和水力特性方面做了大量工作。在 4—6 平方公里面积内进行了地面详查，基岩的勘查深度约 700 米。所获数据用于建立描述现场地质特征和构造特征的模型，以及描述地下水流动的数值模型。

瑞典的调查始于七十年代中期，从那时以来已对几个现场做了勘查（图 1）。1979 年以后勘探的四个现场基本上是根据 Ahlbom 等人（1983）制定的现场综合勘查计划进行的。不过，根据地质和水文条件的变化，对该计划做了一些修改，本文专门介绍该计划的地球物理部分及其所取得一些的经验。

据该计划勘查的四个现场是：

（1）弗贾尔韦顿现场，位于斯德哥尔摩西南 80 公里。该现场的特征是地形平坦，在西北方向有小的断裂山谷。基岩由脉状片麻岩组成，伴有陡倾的花岗片麻岩层。

（2）吉德奥现场，位于恩舍尔兹维克东北 30 公里。该现场处于面积为 100 平方公里的高原区，地形平坦。基岩由脉状片麻岩组成，伴有微倾的花岗片麻岩层。

（3）坎伦杰现场，位于吕勒奥东北 65 公里。该现场处于面积为 16 平方公里的高原，高出周围各地约 100 米。基岩由片麻岩和红色花岗岩组成。在该现场 500 米深处发现一水平断裂带。

（4）斯瓦特博贝尔盖特现场，位于埃德斯宾以西 12 公里的宽 2.5 公里长 5 公里的山脊上。北西向的外围山谷位于山顶下 75—85 米处。基岩由强烈变质的片麻岩和混合岩组成。该现场的特征是存在着彼此间隔 30—80 米的小断裂带。

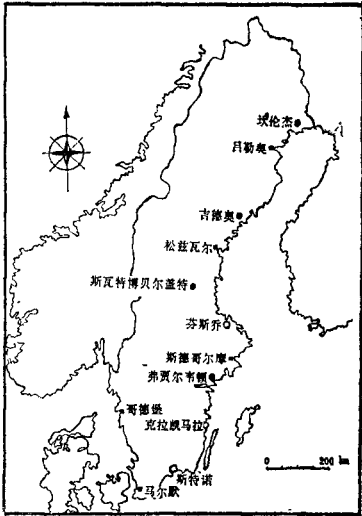


图 1 研究现场的位置。1979 年以后勘查的现场用实心点表示，以前勘查的现场用空心点表示。

现场的 选 择

进行普查研究的目的是继续寻找下一步作详细研究的新现场。通常每年在一、两个现场进行详细研究。选择现场要考虑下列因素：

1. 平坦地形所产生的水力梯度小；

2. 现场不应该有任何主断裂带穿过；
3. 现场内应该少出现小断裂带；
4. 对其不同类型基岩的现场要进行长期有计划的研究。迄今，勘查目标都集中在片麻岩和花岗岩区。

5. 要避开可能有隐伏矿体的地方。

首先根据通用的地质图和地形图及地球物理测量选择详细研究的现场。研究地形图可获得水力梯度及地下水补给区和流出区位置的初步标志。利用井的最大出水量数据来初步估计该地区的水力传导率和基岩类型。用航空照片和卫星图象等资料可获得有关地质构造和是否存在重要线型构造的信息。

对具远景的现场进行野外地质研究，其目的是搜集有关露头、断裂和岩石类型分布的补充资料。然后对经筛选保留下来的现场进行初步的地球物理研究。

沿地面普查剖面，使用质子磁力仪、水平线圈电磁法和甚低频法进行地球物理测量。这种综合方法足以给出现场是否存在较大断裂带和基岩构造的初步标志。对断裂带的倾角、走向和厚度作了推断。所用的点距是20米，磁法测量例外，其点距是5米。

如果认为普查研究的数据仍然有用，那么就可打普查估计来获取某一深度上基岩性质的资料。钻孔一般是垂直的，深度为800—1000米。利用岩心作地质填图，并在钻孔中进行地球物理和水文测量。下面介绍地球物理测量。

对这些研究进行评价之后，再决定是否继续进行勘查。

某现场的地面地球物理勘查

该现场的地面勘查首先是在约100平方公里的面积上进行区域地质和构造研究。然后，对岩石类型分布和断裂带进行详细的地质和地球物理填图。在4—6平方公里的面积上进行了详查，并利用测点木桩线建立了坐标系，作为该现场所有勘查的参考系统。

地球物理测量不仅在坐标系内，而且还在坐标系外剖面上进行。在坐标系内使用的方法是：（1）质子磁力仪测量；（2）水平线圈电磁测量（频率为18千赫，线圈间距60米）；（3）电阻率和时间域激发极化法（利用梯度排列进行测量）。

1983年，Almen等人介绍了勘查所使用的仪器。

采用的线距是40米，点距是20米。实践证明，磁法测量的点距减小到5米更好，因为这样能大大简化对薄岩脉倾角的精确确定。1978年以前，进行勘查时所使用的线距是80米，以此线距来推断断裂带的走向常常是多解的。

磁法测量通常用作基岩构造的一种标志，而且往往可指示出岩性的变化和粗玄岩岩脉的存在。在许多情况下，磁法测量还可指示出断层和断裂带的存在。断裂带中的水可把磁铁矿氧化成赤铁矿，这意味着断裂带可能与磁力低有关。

高频水平线圈电磁法可用于指示断裂带的存在与否。使用高频率和大线圈间距可以获得探测断裂带的高感应数，断裂带可视为板状不良导体。大线圈间距也可使探测深度加大。在高阻薄层覆盖区，高频电磁法尤其有效。然而，在良导粘土覆盖区，所获结果并不理想。在这些情况下，粘土引起的异常比预期由断裂带引起的异常大得多。

在吉德奥实验现场，基岩的电阻率约为 10000 欧姆米，覆盖层的电阻率约为 200—1000 欧姆米，覆盖层厚度为 0—5 米。在大多数情况下，断裂带异常约占虚分量的 3—5 %。钻探之后发现，大多数“强显示”与 5—25 米宽的断裂带一致。

电阻率法也能显示出诸如断裂带和矿化带等良导体的存在。使用梯度排列和大的供电电极距，穿透深度应该是相当大的。供电电极之间的距离约为 1.5 公里，测量电极之间的距离是 20 米。测量结果得出导电矿物的埋深约为 100 米，但尚未确定深部断裂带的位置。

当断裂带与电场方向垂直时，与高频电磁测量相比，电阻率测量似乎能更好地反映出断裂带的宽度。然而，在大多数情况下，用高频电磁测量能更好地分辨断裂带。使用电阻率法的一个优点是它能测量断裂带之间基岩的电阻率。一般来说，高电阻率与断裂很少的基岩相对应。因此，电阻率测量就可以用来发现断裂不发育的岩块。电阻率测量还受到所存在粘土的影响，但与高频电磁测量所受影响的程度不同。

在电阻率测量的同时，利用同样的仪器进行激发极化测量，其目的是将由矿化作用与由断裂带所产生的导电体区分开来。矿化的存在不仅引起高的激发极化值，而且造成低的电阻率值；如果仅有低电阻率值，则估计是由断裂带引起的。在有些情况下，激发极化测量可给出有关不同岩石类型分布的资料，这样可以间接显示断裂带的存在。片麻岩地区常有硫化物和石墨浸染，因此，有相当大的激发极化背景值。

在详查地区的剖面上，进行了地震折射测量。地震剖面的总长度通常为 4—6 公里。所获之结果是由覆盖层的厚度、底层速度和断裂带的存在引起的。地震法通常是其它方法的补充，在有良导覆盖层的情况下，地震法是判断可能由断裂带或矿化作用引起的可疑异常的必要手段。

为了获得该现场附近区域地质构造的资料，利用质子磁力仪、水平线圈电磁法和甚低频法进行了剖面测量。在所有的航空地球物理测量都无效的地方进行了广泛的剖面测量。

进行地面地球物理测量是为了确定该现场内断裂带的位置和方位。这些数据用于建立该现场的初步地质和构造模型。地面测量结合地质资料，还可用来确定勘查深部基岩和断裂带的钻孔位置。

某现场的井中地球物理勘查

为了勘查浅部断裂带，打了冲击钻孔。这些钻孔的深度为 100—150 米，倾角为 50—90°，直径为 110 毫米。在某种程度上，这种钻孔用于做水力干涉实验。在这些钻孔中做下列地球物理测井记录：井斜，点电阻，自然伽玛。

结合井的最大出水量和钻进速度对地球物理测井记录进行解释，以确定断裂带在井中的交点。井斜测量结果指出，冲击钻孔有很大的弯曲段。有些地区，几乎所有冲击钻孔向下都明显偏离预定方向，有些地区则向上偏移。

为了研究深部断裂带的性质，在每个现场用金刚石钻头打了 7—10 个深孔。钻孔直径为 56 毫米，深约 700 米。大部分钻孔的倾角在 60° 左右，至少有一个钻孔是垂直的。对钻孔进行了综合研究，包括岩心地质填图、地球物理测井、压力水注入实验、水压测量和水化学分析。为了确定几个物理参数和详细研究裂隙矿物，还对钻孔岩心做了取样。

用地球物理数据来确定钻孔附近基岩的性质，例如岩性、水力特性和水的化学性质。这些数据还可用于确定井中剖面，详细研究水力传导率和水化学取样。地球物理勘查是确定基岩性质、识别深部断裂带特征的井中综合勘查计划的重要部分。

在所有岩心钻孔中进行标准测井工作，包括下列方法：井斜，自然伽玛，点电阻，电位电极系和梯度电极系电阻率测井（电极排列长度为 1.6 米），自然电位，温度，矿化度（井中流体电阻率），激发极化（仅在每个现场的少数钻孔中进行）。

为了研究基岩物理性质与测井结果之间的关系，利用岩心样品进行了岩石物理性质测量。测量了下列参数：密度、孔隙度、电阻率、激发极化率、磁化率和剩余磁化强度。

由于所用的大多数测井记录都是标准地球物理测井记录，因而，一般不需要做进一步说明。然而，有关取得的经验和研究计划中每一项测井记录的目的还需做一些注释。

自然伽玛测井给出关于基岩矿物成分变化，特别是放射性矿物含量变化的资料。

点电阻测井记录显示出井壁中是否存在断裂和导电矿物。点电阻测井的电极做得很短（5 厘米），而把探头做得几乎完全贴近井壁。探头的直径是 53 毫米，比钻孔的直径小 3 毫米。这种设计致使有可能获得较高的分辨能力，在某些情况下，甚至可分辨出单个断裂。使用直径大的探头可以减小井中流体的影响，但是，对于盐水情况来说（井中流体的电阻率低于 10 欧姆米）分辨率降低。

电阻率测井记录（电位电极系和梯度电极系）给出是否存在断裂带和导电矿物的资料。电阻率测井的探头直径也是 53 毫米，因此，在多数情况下就不需要进行井中流体校正。电测井记录与岩心测井结果一起用于确定断裂带的宽度。电位电极系电阻率测井还可用于确定孔隙度。

由图 2 可见，吉德奥现场未断裂岩石的电阻率在 50000—100000 欧姆米范围内变化。含粘土的断裂带在约 380 米深处产生一个大的电阻率异常。还可以见到两个小断裂带。图上显示出点电阻测井记录的高分辨率及其与断裂出现率的相关关系。

自然电位测井记录显示出导电性矿物（硫化物、石墨）的存在和水在钻孔中的流入或流出状况。

自然电位测量是在钻孔中用铜—硫酸铜电极进行的。使用这种电极比用铅电极有更好的重现性。

温度测井记录显然能给出岩石的温度和温度梯度。由于温度实际上是在钻孔的流体中测量的，因而也可以获得有关透水断裂带和水沿钻孔流动的资料。

井中流体电阻率测井记录可给出地下水的矿化度。矿化度的变化可间接示出透水裂隙的存在。利用四电极系统测量矿化度可使电极氧化引起的误差降至最小值。

由图 3 可见，钻孔上部与几个断裂带相交。

激发极化测井记录能显示钻孔附近导电性矿物（例如硫化物、石墨）的存在。

在单点电阻和断裂出现率的测井记录上清楚地显示出断裂带。有些断裂带也有较高的水力传导率。在温度梯度曲线上很容易看到透水带引起的温度异常。打钻之后仅几天就做了温度测井记录，所以还没有建立起稳定的温度环境。打钻的一个影响是，来自深部的温水注入透水带。此后，温水在断裂处引起随时间衰减的温度异常。后者在断裂带 2 和 3 处可以看到。透水断裂带 4 与矿化度的变化有关。

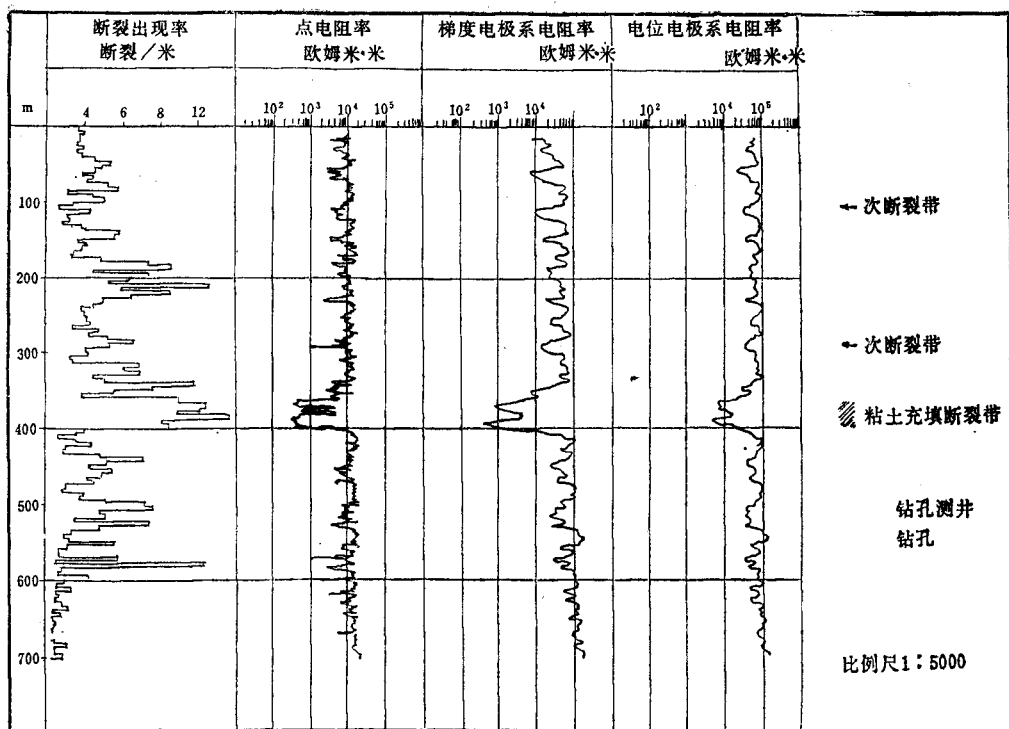


图 2 据吉德奥现场Gi 7 钻孔的电阻率测井和岩心测井所获之结果

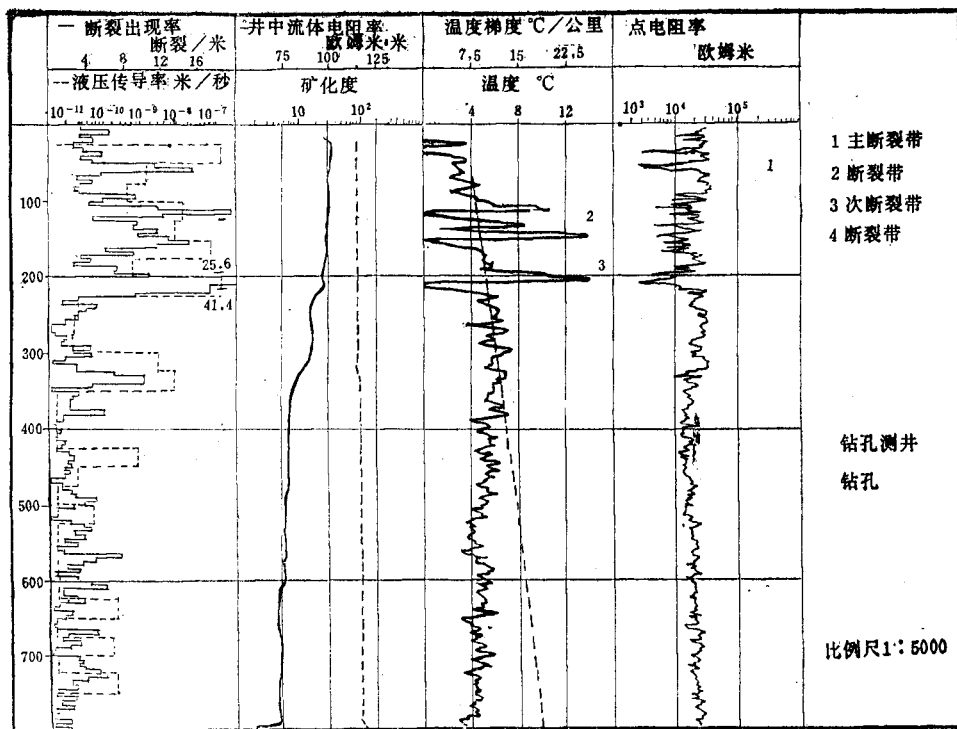


图 3 据坎伦杰现场Km12 钻孔的温度、矿化度、单点电阻和岩心测井所获之结果以及该孔的水力传导率

弗贾尔韦顿现场的Fj5 钻孔是据地球物理测井记录获得岩性资料的一个重要例子（图4）。钻孔中的主要岩石类型是脉状片麻岩或片麻状混合岩。也有花岗片麻岩层，它很重要，因为它与脉状片麻岩相比有较高的水力传导率。花岗片麻岩与脉状片麻岩相比，前者放射性矿物的含量较高，即有较高的伽玛辐射强度；而其硫化物的含量则较低，即有较低的激发极化效应和较高的电阻率。埋深约400米的花岗片麻岩显示得很清楚。测井记录有助于岩心测井，也有助于鉴别冲击钻孔中的花岗片麻岩层。有些基岩还根据其较低的伽玛辐射强度来识别。

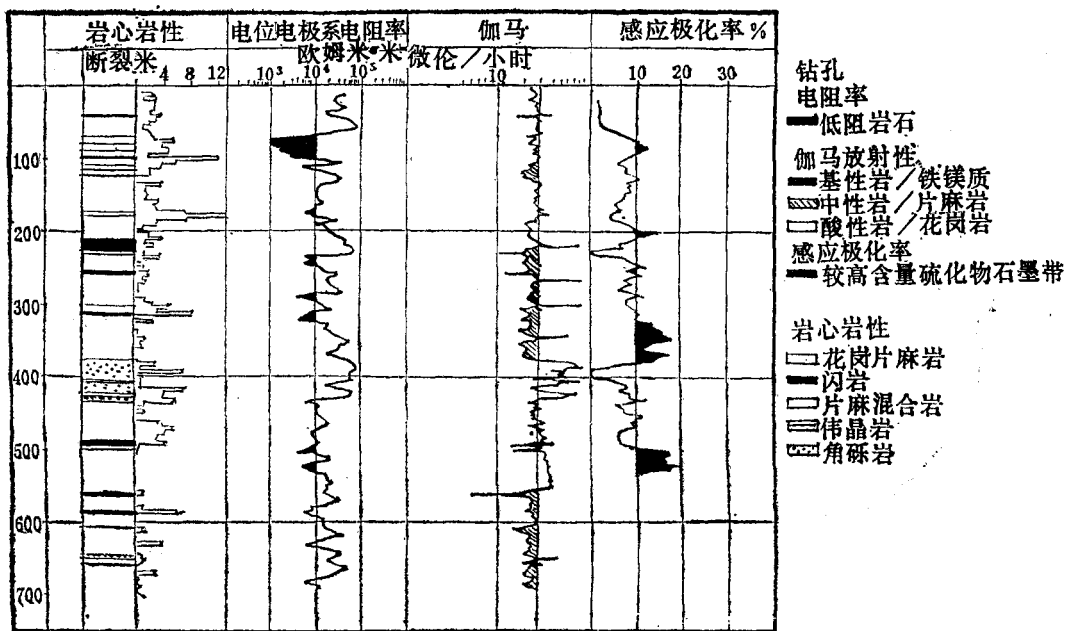


图4 据弗贾尔韦顿现场Fj5 钻孔的电阻率、伽玛、激发极化和岩心测井所获之结果

这种综合测井方法对于确定断裂带的位置和特征是有效的，特别是在良导矿物含量低的岩石中。然而，在硫化物含量较高的地方，就难以区别含水断裂和导电矿物。

对测井资料进行评价时，应把相邻钻孔的地质、地球物理和水文调查结果与地面测量结果结合起来，以建立该现场的三维模型。利用这些数据来推断断裂带的方位、范围和宽度。当数据不准确或太少时，不可能建立可靠的模型。这时就要进行补充测量，例如，扩大地面测量的面积，补充钻孔和就地测量。此外，利用充电法还成功地确定了断裂带的范围和方位。

在现场勘查计划执行过程中，要认真考虑标准勘查应包括哪些测井记录。对目前的计划来说，声波测井记录显然是最佳补充。然而，到目前为止一直没有使用声波测井记录，其主要原因是缺少适用于56毫米钻孔的方便而有效的仪器。不过，声波测井记录不久将纳入计划。

在最近几年的勘查中，所用的方法已有所改变。认为下列测井记录是无效的：感应测井记录（井中水平线圈电磁法）、微分电阻法和甚低频法，因此予以取消。

结 论

在瑞典的几个花岗岩和片麻岩地区所完成的上述地球物理计划表明,在高阻薄层覆盖的情况下,地面勘查计划对于探测倾斜断裂带是有效的。所用的方法不可能探测近水平断裂带,至少在某个深度上探测不到。

地球物理勘查可给出有关现场的地质和水文特征的一些有价值的数字。地球物理测井方法对确定断裂带和不同岩性单元通常是有用的。在马格纳森和杜兰的详细研究中,曾发现断裂出现率与电阻率之间有良好的相关关系。然而,电阻率与水力传导率之间几乎没有关系。温度和矿化度测井记录实际上提供了最好的水力资料。需要采用费用低于水力注入试验的新的地球物理测井记录来提供定量水文资料。

在进行这类勘查时,需要获得有关基岩性质和离钻孔较远的断裂带的资料。由于该项计划所使用的井中方法通常只能给出钻孔周围一小块地区的资料,因而,需要发展具有高分辨率和大范围的跨孔地球物理方法。

汪云鹏译自《Geoexploration》, 22, 1984.

陈秀英、本刊编辑部校