环保钻井液发展现状及展望

王先兵¹ 李维² 杨欢¹ 陈龙¹ 周井红³ 张佳寅¹

(1. 中国石油西南油气田公司工程技术研究院; 2. 中国石油西南油气田公司; 3. 中国石油西南油气田公司川中油气矿)

摘 要 在满足油气田钻井工程要求的同时,达到环境保护需求的钻井液是重要的研究方向。综述了环保钻井液检测评价方法和国内外应用最广泛的5种环保钻井液体系;结合环保钻井液发展现状,探讨了钻井液环保方面存在的问题及发展方向,从环保认识应更清晰,环保法规和环保评价标准应更细化明了和因地制宜,并建立严格的环保检测制度和现场操作规范等方面提出了意见和建议。

关键词 环保钻井液; 环保检测; 评价方法; 标准规范

DOI:10.3969/j.issn.1005-3158.2019.01.003

文章编号:1005-3158(2019)01-0009-05

0 引 言

随着国家对环境保护的日益重视,环保理念进步和环保事业发展对钻井行业提出了更高要求。由于钻井液及岩屑是钻井行业最主要的污染物来源,因此研发环保型钻井液处理剂,形成满足钻井工程和环境保护需要的钻井液体系成为当前钻井液技术研究的重要课题,高效、低成本和无毒钻井液的研发成为重要方向,满足越来越高钻井工程要求的同时将钻井液对环境损害程度控制到最小。

1 环保钻井液检测评价方法

钻井液中含有大量的无机和有机处理剂,废钻井液会对生态环境造成严重污染,废钻井液的主要污染物来源包括有机物、烃类、无机盐以及土粉、加重材料和钻屑等固体废物,主要污染指标是高色度、高矿化度和高 COD_{Cr} (化学需氧量)、 BOD_5 (五日生化需氧量)等,同时存在重金属污染和生物毒性等问题。生物降解性和生物毒性评价是目前对钻井液及其处理剂环境可接受性评价的两个主要评价指标。

1.1 生物降解性评价方法

钻井液处理剂利用细菌和真菌等微生物的生化反应(如氧化作用、脱氧作用、还原作用、水解作用、脱羧作用等),在酶的催化作用下,将钻井液处理剂中的醛类、脂类、亚硝酸等氧化,将醇类、硫酸盐和硝酸盐等还原,从而使钻井液处理剂分解成简单的碳水化合物、水和金属氧化物等简单基础化合物。

生物降解性评价方法主要有 BOD_5/COD_{Cr} 比值评定方法、生化呼吸线评定方法和三磷酸腺苷(ATP)

量测定法,其中, BOD_5/COD_{Cr} 比值评定方法由于设备普遍和操作简单,得到了国内外的广泛认可。普遍认为, $BOD_5/COD_{Cr} < 0.3$ 的废液属于难生物降解废液,在进行必要的预处理之前不宜采用好氧生物处理;而 $BOD_5/COD_{Cr} > 0.3$ 的废液易于生物降解。在各种有机污染物指标中,总有机碳(TOC)、总需氧量(TOD)等指标与 COD_{Cr} 相比,能够更为快速地通过仪器测定,且测定过程更加可靠,可以更加准确地反映废水中有机污染物的含量。随着近几年来上述指标测定方法的发展、改进,国外多采用 BOD_5/TOD 及 BOD_5/TOC 的比值作为废水可生化性判定指标,并给出了一系列的标准。但无论 BOD_5/COD_{Cr} 、 BOD_5/TOD 或者 BOD_5/TOC ,方法的主要原理都是通过测定可生物降解的有机物(BOD_5)占总有机物(COD_{Cr} 、 TOD 或 TOC)的比例来判定废水可生化性。该种判定方法的主要优点在于: BOD_5 、 COD_{Cr} 等水质指标的意义已被广泛了解和接受,且测定方法成熟,所需仪器简单^[1]。

另外,针对海洋环境,还有一些其他的评价方法^[2-3]:(1)海水 OECD306 评价法,以 BOD_5 为实验参数,评价有机物在自然海水中好氧生物降解难易的密封瓶评价法,在一定时间内消耗的溶解氧越多,说明其越容易生物降解。自然海水既为实验介质又为微生物来源。(2)海水 BODIS 评价法,专门为难溶有机物设计的好氧生物降解性评价方法。自然海水既为实验介质又为微生物来源。该方法与上述 OECD306 法的主要区别在于: $BODIS$ 法的实验过程中持续补充氧气保持海水中的溶解氧始终处于饱和状态,而 OECD306 法的实验过程全密封,不补充氧气。因此

BODIS 法的有机物降解速率相对较快,使用的有机物和营养元素浓度较高。(3)海水 ISO/DIS11734 评价法,以自然海水为实验介质,根据海水中硫酸盐减少或溶解硫化物增加来评价有机物在厌氧条件下的生物降解性。

1.2 生物毒性评价方法

生物毒性评价是用于评估钻井液体系对环境潜在污染和毒性危害的直接手段。美国石油学会(API)推荐钻井液毒性评价采用急性毒性试验方法,根据试验生物的不同,主要有糠虾法、微生物毒性法、生物累积发光法和海胆受精法等。其中糠虾法是美国国家环保局正式批准的常规检测法。对于海洋钻井,国内外一般采用 96 h 内急性半致死浓度 LC_{50} 来表示钻井液的毒性, LC_{50} 值越小,其毒性就越大;美国环保局(EPA)规定钻井液的排放标准是 $LC_{50} \geq 30\ 000\ \text{mg/L}$ 。而我国考虑自身海域生物的普遍性,规定了中国明对虾、斑节对虾、长毛明对虾、卤虫、裸项栉虾虎鱼、凡纳滨对虾、脊尾白虾和蒙古裸腹蚤 8 种海洋生物,规定采用两种或两种以上实验生物进行检验,涵盖了鱼类、甲壳类和枝角类生物,占据了不同生态位和食物链等级。

由于海洋生物与陆上生物的习性和生活环境不同,在陆上生物毒性检测方面,主要采用发光细菌法、半致死量法等毒性评价方法。发光细菌法 Microtox 生物毒性测试技术以费希尔狐菌(发光细菌)作为受试菌种,利用其接触有毒污染物后发光强度的变化,快速测试样品液毒性,具有简单、快速和廉价的特点,受到了钻井液毒性测试领域的广泛重视,已被加拿大和美国等国家批准为钻井液排放的毒性监测方法。 EC_{50} 代表半有效抑制浓度,即费希尔狐菌液光强度减少一半时样品液的有效浓度,其值越小,则毒性越大;当 $EC_{50} \geq 30\ 000\ \text{mg/L}$ 时即达到排放标准^[1-2]。

2 环保钻井液体系

针对环保钻井液的研究与应用,国内外学者开展了大量科研工作,形成了多套环保钻井液体系,并取得了一些应用成果,但应用最多、效果最好的环保钻井液主要包括多元醇钻井液、甲基葡萄糖苷钻井液、有机盐钻井液、稀硅酸盐钻井液和合成基钻井液 5 种体系。

另外,近年来国内外研究者基于植物油、合成酯和聚醚等环保材料研制了 XPL+、DFL、GreenLube 等多种环保润滑剂;基于天然生物材料引入抗温单体、接枝共聚等改性方法,开发了多种环保降滤失剂;

开发出了多羟基糖苷防塌剂 DTG-1 和聚乙烯多胺等环保防塌处理剂等。这些新研发的环保处理剂开展了部分应用试验,取得了一些应用成果,但没有形成成熟体系和达到推广应用效果^[1]。

2.1 多元醇钻井液体系

多元醇钻井液体系是一种以多元醇为主剂配制而成的环保型水基钻井液体系,不仅具有良好的页岩抑制性、润滑性、高温稳定性及抗污染性等,而且无毒,易生物降解,对油层损害小。在国外已经被广泛用于对付水敏性地层和海洋钻探,并取得良好效果。

应用在钻井液中的多元醇以聚多元醇为主,主要有聚乙二醇、聚丙二醇、聚甘油酯和 EO/PO 共聚物等。一般随其分子量增大,水溶性和毒性均降低,除聚乙二醇在分子量高于 1 000 呈固体外,常用的其他产品在室温下均为黏性液体,无毒。多元醇结构不同、分子量不同以及 EO/PO 共聚物中 EO 与 PO 比例不同,均会改变多元醇的性质,从而会影响多元醇在钻井液中的使用效果^[3-4]。

2.2 甲基葡萄糖苷钻井液体系

钻井液中使用的烷基葡萄糖苷是糖的半缩醛羟基与具有一定活性基团的化合物反应生成含醚键结构的淀粉与糖的衍生物。甲基葡萄糖苷 MEG 基液本身就是很好的页岩抑制剂,甲基葡萄糖苷可以吸附在地层泥页岩表面,形成一层半透膜,因而可通过调节甲基葡萄糖苷钻井液的水活度来控制钻井液与地层水的运移,甚至使页岩中的水进入钻井液,因此 MEG 钻井液体系能有效地抑制泥页岩水化膨胀,维持井眼稳定,保护油气层,同时还具有良好的润滑性能、抗污染能力和高温稳定性,并且无毒、易生物降解,对环境影响极小。自从 1994 年 MEG 钻井液体系在墨西哥湾高水敏性页岩层成功应用后,国外已成功地使用 MEG 钻井液钻大斜度井和水平井。为使钻井液具有理想的页岩抑制性及形成有效的半透膜,甲基葡萄糖苷在钻井液中的用量至少在 35% 以上,理想加量 45%~60%。如果与 7% 以上的无机盐复配可将用量降到 25% 左右,但环保性能又将受到影响^[4-6]。

Simpson, J. P. 等按 EPA 规定,对甲基葡萄糖苷进行生物降解评价,分别对浓度为 20 mg/L 和 40 mg/L 的甲基葡萄糖苷溶液进行了改进生物降解试验,结果测得 28 d 产生的 CO_2 为理论产量的 86%,高于 EPA 规定的 60%。浓度为 80% 的甲基葡萄糖苷溶液的 LC_{50} 值高于 500 g/L,完全符合 EPA 规定的排放标

准。因此,甲基葡萄糖苷钻井液是一种无毒、易生物降解的环保钻井液^[5]。

2.3 有机盐钻井液体系

有机盐钻井液主要为甲酸盐,该体系在防塌性能、抑制性能、保护环境、保护储层、抗高温、抗污染、腐蚀性低及可以回收再利用等方面具有显著特点。甲酸盐钻井液体系由甲酸的碱金属盐、聚合物增黏剂和降滤失剂等组成,不需要固体加重剂,就可使该体系的密度达到 2.3 g/cm^3 ,容易实现无固相钻进或低固相钻进;黏度低,流动性好,摩阻小;抑制性强,井壁稳定,井径规则;对金属、橡胶等腐蚀性小;可回收,可重复利用,自1995年试验成功后在钻井行业中取得了良好的应用效果。

甲酸盐钻井液比常规的盐水体系更易于为环境所接受,对水域生物的试验证明,甲酸钠和甲酸钾都可以归入无毒性,甲酸铯可归于实际无毒性。所有甲酸盐引入水稀释后,都能很快降解,在水中只能短期存在,生物降解试验表明,所有甲酸盐28 d内生物降解率大于70%,都可以归入“易生物降解”类物质^[3]。

2.4 稀硅酸盐钻井液体系

高浓度的硅酸盐钻井液因其流变性难以控制而受到应用限制,低浓度的硅酸盐钻井液具有优良抑制防塌性、无毒、无荧光、保护环境、保护储层、低成本等特性受到青睐。普遍使用的硅酸钠产品溶液模数为2.1~2.5,固相含量为30%~40%,pH值控制在11~12。

现在国内外研制开发和应用的硅酸盐钻井液体系主要有:(1)硅酸盐-聚合物钻井液体系;(2)硅酸盐-硼凝胶钻井液体系;(3)混合金属硅酸盐钻井液体系;(4)植物胶-硅酸盐钻井液体系。硅酸盐钻井液有较好的稳定井壁作用,其稳定井壁机理有以下3点:(1)硅酸盐进入地层孔隙形成三维凝胶结构和不可溶沉淀物,在近井壁处快速堵塞页岩孔隙和微裂缝,阻止滤液进入地层,同时减少了压力穿透;(2)硅酸盐能抑制页岩中黏土矿物水化膨胀和分散;(3)硅酸盐可能与页岩中黏土矿物发生反应生成有利于井壁稳定的新矿物,如硅酸盐的硅醇基与黏土矿物的铝醇基发生缩合反应,把黏土等矿物颗粒胶结成牢固的整体^[6-7]。

2.5 合成基钻井液体系

合成基钻井液以人工合成或改性有机物,即合成基液为连续相,盐水为分散相配制而成的油包水乳化钻井液。合成基钻井液依据基液的分子结构特征可分为:脂肪酸与醇类反应而成的酯类;醇类缩合反应

而成的醚类;乙烯、丙烯等单体调聚而成的聚 α -烯烃(PAO)类;由石油分馏精制提纯的线性石蜡;线性 α -烯烃(LAO);异构烯烃(IO)。

合成基钻井液不含芳香烃,毒性小,可生物降解,对环境无污染;高闪点,低凝固点,可在寒冷地区和深水海域应用;钻井污水、钻屑和废钻井液可直接向海洋排放。此外,合成基钻井液还具有润滑性能良好、有利于油层保护和稳定井壁、不含荧光类物质、不影响测井和试井资料等优点。尽管合成基钻井液配制成本远高于水基钻井液和油基钻井液,但使用合成基钻井液减少了处理油基钻井液废液的费用和使用水基钻井液时钻机占用时间及复杂情况,因此,在大多数井中,使用合成基钻井液的钻井总成本要低于使用油基钻井液和水基钻井液的钻井总成本^[6-7]。

上述5种环保钻井液体系经过国内外多年的研究与应用,取得了成功应用案例,能部分满足环境敏感地区的作业要求,具有低毒或无毒、可生物降解性能,但其总体成本高,无法广泛推广使用;其次,当前这些环保钻井液多数要与其他非环保处理剂复配使用才能达到良好性能,致使体系的环保优势受到不同程度的影响;再次,部分环保钻井液的流变性控制困难、抗温和抗污染性能不足,在高温深井、复杂井中的应用受限。

3 钻井液环保方面存在的问题及发展方向

环保钻井液的研究与应用持续了多年,但环保钻井液的应用效果和普及程度不理想,主要存在以下原因。

1) 环保意识和认识应更清晰

环境意识包括两个方面的含义,其一是人们对环境的认识水平,即环境价值观念;其二是指人们保护环境行为的自觉程度。这两者相辅相成,缺一不可。环保工作是一个系统工程,涉及到生产中各个环节,且投入成本高,需要各级工作人员从潜意识中注重环保,坚定环保态度并应用于工作中各个方面。

就钻井液专业而言,环保意识正在逐渐建立,但对环保工作的理解,一方面存在认识不够透彻,未完全领悟到环保工作的本质要求。某些环保工作流于形式、居于表面,为了工期进度或者节约成本而降低环保要求。

另一方面存在认识不够准确,甚至出现一些偏激现象。不经删选地断定与钻井液相关的废物均为危化品,甚至谈“钻井液”色变,没能很好地认识理解环保概念和工作生产。因此,应在坚定地树立环保意识的同

时更准确地认识、理解环保工作,协调好环保与生产的关系,在安全环保条件下放心大胆地开展工作。

2) 环保法规和环保评价标准应更细化明了和因地制宜

为了使作业人员能更清晰地认识和理解环保工作,除了宣传灌输环保概念之外,应对各个地区的自然环境综合评估后制定针对该地区的钻井液环保法规和环保评价标准,使钻井液环保工作有章可循,有标可查,做到有理有据,明目清晰。

国际和国外组织(如 ISO、API)在其石油天然气开采业标准体系中,都含有环境保护专业的标准,包括大量的单项标准。API 标准中约有 15% 的标准为专项环保标准,另外约 20% 的标准涉及到污染预防与控制。国际上大部分国家都有系统的石油天然气开采污染物排放控制标准,如美国、英国、加拿大、尼日利亚等,这些标准在制订过程中,由于石油公司的广泛参与,标准主要是基于最佳实用技术而制订的,具有显著的行业特点和地区特点,有些还有明确的工艺技术要求,便于执行、检查和评估。

因此,可借鉴 API 等国际标准和海洋石油勘探开发的环保标准,以及陆地污水排放标准和固废处理标准,结合当地具体自然环境,因地制宜,制定详细的陆地钻井液环保法规和环保评价标准,例如针对饮用水源区、农业灌溉区、沙漠戈壁区、牧场区等,制定相应的钻井液及钻屑的环保处理标准。

例如,对于水基钻屑,目前大多采用固化处理方法。钻井过程中,从表层段到产层段、从清水/无固相钻井液到聚磺钻井液,将所有的岩屑全部固化处理,这样没有区别的处理方式不仅增加了岩屑处理成本,同时增加了二次污染风险。因此,可根据不同的钻井液体系而制定不同的岩屑处理标准、采用不同的方法处理地层岩屑。

3) 建立环保监测制度

根据确切自然环境和钻井液体系制定的钻井液及钻屑的环保处理标准,建立对应的环保检测制度,开展各个环节的实时环保检测。

例如,对配制钻井液所使用的原材料和处理剂、实钻钻井液、返出的岩屑、处理后的岩屑、生产废水等,分别进行环保跟踪评价。以检测数据为依据判断钻井液及岩屑的环保性,减少人为因素干扰,避免主观判断,避免谈“钻井液”色变的现象。

4) 严格现场操作规范

按照环保规章制度和环保标准,为了达到环保要求,在现场实际生产过程中,必须建立起相应的操作

规范,并严格遵守,才能达到预期环保目标。

例如,因钻井工程需要,在不同井深、不同层位将采用不同钻井液体系,其中,一部分钻井液体系满足环保要求,另一部分达不到环保要求,在现场实际生产过程中,就应该严守操作规范,将不同环保属性的钻井液和岩屑严格分开使用和存放,做到专“液”专用,定点存放,尽可能不让环保钻井液受到交叉污染。这会增加一定的生产费用,但同时会降低后期环保处理费用。

5) 环保钻井液体系价格昂贵和环保处理剂抗温性不足

目前已研发出并有成果应用的环保钻井液体系,没有得到大面积推广应用的主要原因之一是环保钻井液体系价格昂贵及环保处理剂抗温性不足。一方面环保钻井液的成本居高不下,不满足降本增效的经营要求;另一方面,对于深井、超深井、复杂井,大部分的环保钻井液性能难以满足钻井工程需求,尤其是环保处理剂的抗温能力不足^[8-9]。

国内常说的环保钻井液体系很难做到真正环保,因为体系中的环保主剂使用量远远达不到要求,远达不到该环保体系的加量标准。例如,MEG 环保钻井液,甲基葡萄糖苷在钻井液中的用量至少在 35% 以上,理想加量 45%~60%,而日常应用中加量却很难超过 8%,只是在常用的聚磺钻井液中加入少量的环保处理剂,改变不了钻井液不环保的本质。

因此,研发性能优良、成本低和无毒环保型钻井液处理剂和体系,达到满足钻井工程 and 环境保护需要是环保钻井液发展的重要方向。

4 结 论

针对钻井行业的环境保护工作,一方面需要加强树立环保意识,另一方面也需要对环保工作有清晰的认识,以量化指标判断工业废物的环保性;应对各个地区的自然环境综合评估后制定针对该地区的钻井液环保法规和环保评价标准,做到明目清晰、细化明了、量身订做和因地制宜;根据法规和标准,建立对应的环保检测制度,开展施工过程中各个环节的实时环保检测;在现场实际生产过程中,建立起相应的操作规范,并严格遵守,最终达到预期环保目标。

钻井液处理剂的环保属性、成本与钻井液性能稳定性的矛盾是技术攻关的重要方向,尽可能利用来源丰富、价格低廉的天然材料进行化学改性,提高其综合性能,降低成本;在新处理剂及钻井液体系的推广应用过程中,要将钻井和环境保护有机地结合起来,从钻井成本和环境效益两个方面综合评判新型处理剂及

钻井液体系的推广应用效果,以获得最佳的综合效益,低成本高性能的无毒环保钻井液是发展的主要方向。

参考文献

- [1] 潘丽娟,孔勇,牛晓,等.环保钻井液处理剂研究进展[J].油田化学,2017,4(34):734-37.
- [2] 邢希金,王荐,何松,等.关于我国环保钻井液标准的探讨[J].石油工业技术监督,2018,5(34):18-22.
- [3] 盖国忠,李科.钻井液环境可接受性评价及环保钻井液[J].西部探矿工程,2009(2):57-59.
- [4] 李树斌,郭艳,张宏利,等.新型环保钻井液体系研究综述[J].油气田环境保护,2004,1(11):17-20.
- [5] 杨振杰.环保钻井液技术现状及发展趋势[J].钻井液与

- 完井液,2004,2(21):39-42.
- [6] 黄念义.环保钻井液技术现状及发展趋势浅谈[J].化学工程与装备,2017(8):231-232.
- [7] 周洪奎.环保钻井液技术进展研究[J].西部探矿工程,2018(9):89-90.
- [8] 秦岩.新型环保水基钻井液应用实践[J].西部探矿工程,2018(9):39-41.
- [9] 段志锋,陈春宇,黄占盈,等.天然高分子环保钻井液体系的构建与性能评价[J].科学技术与工程,2018,25(18):32-36.

(收稿日期 2018-10-07)

(编辑 王薇)

你知道这些新能源吗?

浪力及潮流发电。在自然能源的利用中,最多的是不太需要维修的太阳能发电,其次就是浪力发电。浪力发电的原理是,将波浪或浪涛造成的海面上下波动转换成气压,然后,利用气压的力量来推动涡轮机发电。它主要作为海上交通航路标记的灯塔、灯标以及浮在海上的浮灯标等的电源。所谓潮流发电,就是利用海潮水流推动涡轮机来进行发电。

燃料电池。所谓燃料电池,是一种在使氢与氧发生化学反应后直接发电的装置。从天然气到生物气体,只要能够产生氢的物质都可以被利用,同时,它不燃烧,所以几乎没有有害气体排出。而且,从理论上来说,其能量效率达60%,而如果加上化学反应所产生的内能的利用,能量效率将达到80%以上,高于其他发电系统,这是燃料电池的重要特点。20世纪60年代,燃料电池作为宇宙飞船的电能而开始走向实用化。后来,以石油危机为契机,世界各国开始将燃料电池作为一种取代火力发电的发电系统对其进行各种研究开发。在研究开发的各种燃料电池中,有一种发电方式——直接甲醇燃料电池,它是以甲醇直接取代纯氢为燃料,在装置内除去氢气后进行发电。直接甲醇燃料电池能够做到小型化,所以,现在一些大规模的家电厂商主要将其作为笔记本电脑和手机的电源进行开发。

“可燃冰”沉睡海底的未来能源。人们都知道,天然气管道里奔流着气体和水的混合物,而这个管道经常会发生故障,天然气中的甲烷分子被水分子吸收,其结果,会产生白冰一样的物质并使管道堵塞。这种物质就是所谓的“可燃冰”——甲烷水合物。所谓“甲烷水合物”,是由水分子与甲烷分子组合而成的冰状固体物质,它在低温和高压下保持稳定状态,主要埋藏在永久冻土层下或是海底深处地层中,如果能将甲烷水合物中的甲烷分离出来,那它就能成为取代石油和煤炭的能源,因此20世纪70年代以后,甲烷水合物便开始作为一种极有潜力的新能源而受到世界的关注。可燃冰是一种天然气水合物的俗称,这种物质在低温和40多个大气压下才是稳定的。可燃冰到达水面可以立即融化,同时成分中的甲烷开始燃烧。每立方米可燃冰可释放164立方米甲烷。可燃冰分布广,资源丰富,据计算这种未来的能源可供人类使用上千年。可燃冰杂质少,无污染。可燃冰虽好,但开采不易。

冰雪能源的利用。能否使冰雪成为一种资源呢?研究表明,雪可以用作保冷和制冷的能源。现在,以雪为能源的保冷制冷装置已经投入使用。在保冷方面,把雪放入储存库里,库内可以终年保持0—4℃,这最适合农作物的储藏,而且,其成本比用电控温要低。在制冷方面,利用设置在公寓等住宅里的储雪库,可以用两种方式达到制冷目的,一种是使房间与储雪库的空气相互循环,即“全空气循环式”;另一种是将雪融化成冰水后进行制冷,即“冷水循环式”。按照能量换算,一吨雪所能产生的热能相当于10升原油的能量。

海洋温差发电。所谓海洋温差发电,是利用大海表层与深层的温差来生电。其方法是,用表层海水对沸点较低的氨水进行热化,并使之蒸发,用其蒸汽来推动涡轮机。然后,用冰冷的深层海水对蒸汽进行冷却,使之还原为氨水,如此周而复始。只要有15℃的温差,就可以发电。而且,这个装置能使海水在一瞬间就成蒸汽,并产出淡水。它可以为缺水地区提供电和水。利用该装置产出的水,还可以生产出燃料电池所必需的氢。不仅是海水,温泉地或是工厂排出的温废水等也可以用于发电。

(供稿:江苏省沛县张街中学 张振楼)