

乏燃料后处理迫在眉睫，投资机会有哪些？

2022年05月03日

- **本周关注：天地科技、郑煤机、华荣股份、苏试试验**
- **本周核心观点：近期宏观环境波动，对设备行业股价影响较大。我们认为，短期影响依然没有消除，整体判断仍然延续波动走势。当前，上游资源品涨价、政府稳增长仍然是相对确定的两条主线，相关的煤机、油服、核电、氢能等设备板块预计将有所受益。**
- **乏燃料对环境危害性极大，但具有再利用价值。**乏燃料是指核燃料中裂变核素铀逐步消耗，不足以维持裂变反应后从反应堆中取出的燃料，乏燃料后处理一方面可循环利用铀、钚元素，降低我国对铀资源的依赖度，另一方面可降低对环境的威胁。乏燃料的半衰期可达数万年，放射性对环境也有很大威胁，处理后高放废物的体积将被压缩到原来的 1/4，其长期放射性毒性将被降低一个数量级以上。
- **我国乏燃料后处理能力十分匮乏，未来市场空间达千亿。**据头豹研究院数据，每 100 万千瓦核电设备容量的乏燃料年产量约为 21 吨。据此我们测算，**2021 年乏燃料产量约为 1123 吨，累计产量为 9841 吨。**相比之下，**目前我国的乏燃料处理能力仅为 50 吨。**据我们测算，**到 2030、2035 年，乏燃料年产量将分别达到 1876 吨、2394 吨，**则届时我国至少分别建成 2 座、3 座 800 吨处理厂（或等量的处理能力），才能实现乏燃料产量和后处理能力的平衡。**预计到 2030 年乏燃料后处理的市场空间分别为 3000 亿元，其中设备投资约 1527 亿元。**到 2035 年乏燃料后处理市场空间约为 4500 亿元，其中设备投资约 2290 亿元。
- **预计 2025 年在堆储存能力将达到饱和，后处理项目属于刚性需求，确定性较高。**根据《中国经营报》，**中国目前的核电站是按照自身存储 10 年乏燃料设计。**则每建造 100 万千瓦机组，对应增加 200 吨乏燃料储存能力。根据我们的测算，到 2025 年，即装机容量达到 7000 万千瓦时，我国核电站乏燃料储存能力将出现饱和。因此，**虽然乏燃料储存能力随核电装机容量增加而增加，但乏燃料累计的速度要高于贮存能力的增速。**由此可见，与乏燃料后处理产能之间的矛盾日益突出。而实际上，根据兰石重装 2021 年年报，**目前大亚湾核电站在对贮存水池已经饱和，开始向岭澳二期倒运；到 2025 年，预计将有超过 10 个核电站在堆贮存能力饱和。**
- **我国选择乏燃料后处理技术路线已成定局，PUREX 是目前的主流技术路线。**世界上处理乏燃料的方式主要分两种，一种是通过剪切封装后直接进行深埋，瑞典、加拿大、西班牙、美国采取这种方式。另一种是闭式燃料循环，即分离铀、钚元素，降低活性核放射性后在进行填埋，目前法、英、日、印度等国家均采用这一路线，中国也选择这一技术路线。PUREX 是目前乏燃料后处理的主流技术路线，其工艺流程主要包括首端处理（切割、去包壳、溶解、过滤等）、萃取分离（铀、钚与裂变产物的分离与净化）、尾端处理（铀、钚氧化物的生成）。
- **主设备国产化任重道远，部分领域已取得突破。**目前我国后处理产业已实现部分设备国产化，进入市场推广阶段，如**中子吸收材料、常规机械电气设备。**部分产品需在现有核电基础上进行适应性开发或改进，如**远距离操作阀门、机械手、热室等。**然而，PUREX 技术的工艺流程主设备技术难度较高，国产化仍然任重道远。例如，剪切机、溶解反应器、离心澄清器、脉冲过滤器、萃取分离器、玻璃固化装置等。
- **投资建议：建议关注江苏神通、景业智能、兰石重装、通裕重工、应流股份。**
- **风险提示：订单取得不连续导致业绩波动的风险，乏燃料项目推进不及预期风险，客户集中度较高的风险。**

推荐

维持评级



分析师：李哲

执业证号：S0100521110006

电话：13681805643

邮箱：lizhe_yj@mszq.com

研究助理：赵璐

执业证号：S0100121110004

电话：13472540636

邮箱：zhaolu@mszq.com

相关研究

- 1.机械行业周报 20220424：影响激光掺杂设备短期替代程度的因素分析
- 2.民生机械周报 20220417：国产机床发展现状与挑战
- 3.民生机械周报 20220409：海风碳纤维：2021 年约 3.5GW 使用，预计 2023 年用量加速
- 4.机械行业周报 20220404：2022 年硬质合金刀具行业供需测算
- 5.机械行业周报 20220327：光伏异质结电池设备进展跟踪（一）

目录

1 上周组合表现	3
2 为什么说乏燃料处理迫在眉睫？	4
3 乏燃料后处理领域市场空间测算	6
4 乏燃料处理工艺及相关设备	8
4.1 在堆储存.....	8
4.2 PUREX 技术及装备.....	9
5 相关标的	13
5.1 景业智能.....	13
5.2 江苏神通.....	13
5.3 兰石重装.....	14
5.4 通裕重工.....	14
5.5 应流股份.....	15
6 风险提示	16
插图目录	17
表格目录	17

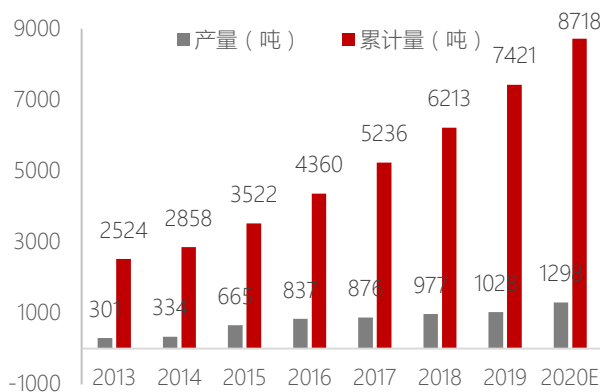
1 上周组合表现

上周关注组合: 天地科技、郑煤机、吉林碳谷、华荣股份。截至 2022 年 4 月 29 日, 周区间涨跌幅 1.24%, 同期机械设备申万指数涨跌幅-2.84%, 同比跑赢设备指数。组合开始至今, 累计收益率-26.99%, 跑输沪深 300 指数 9.12pct, 跑赢申万机械指数 2.19pct。

坦、加拿大、纳米比亚、尼日尔和澳大利亚。因此，建立乏燃料后处理闭式循环，对于提升我国铀资源利用率，制备钷铀混合燃料用于热堆、快堆，提升铀、钷等资源战略储备，保障能源安全等具有重要意义。

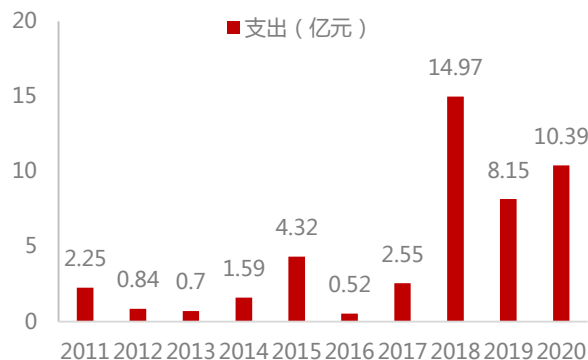
乏燃料后处理可降低对环节的威胁。乏燃料的半衰期可达数万年，其放射性对环境有很大的威胁，因此必须妥善处理。随着我国核电站运营规模不断扩大，乏燃料数量逐步增加。据头豹研究院数据，每 100 万千瓦核电设备容量的乏燃料年产量约为 21 吨，另据华经产业研究院数据，2020 年中国乏燃料产量为 1298 吨，累积待处理乏燃料 8718 吨，而目前我国乏燃料处理能力仅为 50 吨/年，在建处理能力也仅为 200 吨/年，未形成规模化乏燃料后处理能力，离堆贮存能力也已基本饱和，无法满足未来乏燃料的处理需求。乏燃料后处理后，高放废物的体积将被压缩到原来的四分之一，其长期放射性毒性将被降低一个数量级以上。

图 3：2013-2020 年中国乏燃料产量及累积情况



资料来源：华经产业研究院，民生证券研究院

图 4：2011-2020 年政府性基金乏燃料处理处置支出



资料来源：头豹研究院，民生证券研究院

我国乏燃料后处理的现状如何？

已有处理产能：我国于 2006 年，在甘肃兰州建造了第一座乏燃料后处理中间试验厂，中核四零四厂，该厂拥有一座容量为 500t 的乏燃料贮存水池，目前正在建设一座容量为 800t 的乏燃料贮存水池，拥有年处理 50t 的乏燃料处理能力，2011 年该中试厂热调成功，2013-2015 年间对约 50 吨的乏燃料进行了再处理。这标志着我国初步掌握了后处理核心技术，也是我国目前仅有的已建成乏燃料后处理厂。

后期规划：后续乏燃料处理厂的规划主要有两个项目，一是建设 2 个具有国内自主知识产权，年处理能力达 200 吨的大型商用乏燃料后处理厂。另一个是中法合作建设的 800 吨后处理厂。

2012 年 12 月，中核集团在第二次科技工作会议上发布“龙腾 2020”科技创新计划，首批入选的 8 个示范工程就包括具有自主知识产权的 200 吨大型商用乏燃料后处理示范工程。截至目前，第一座 200 吨处理厂正处于建设中，预计于 2025 年开始运营。而第二座 200 吨乏燃料处理厂也在 2020 年底开始建设。根据《甘肃日报》2017 年 11 月报道，甘肃省与中国核工业集团在兰州签署战略合作协议，中核集团将投资 5000 亿元，与甘肃省在核技术产业园、装备制造等领域开展合作。甘肃核技术产业园主要聚焦核循环产业，按照 800 万吨处理厂耗资约 1500 亿元计算，5000 亿元投资约对应 2600 吨左右处理能力。由此可见，未来乏燃料处理领域仍有较大成长空间。

2013 年 4 月，中核集团与法国阿海珐签署了年处理能力 800 吨，储存能力 600 吨的乏燃料商业处理-在循环工厂合作项目，该项目从设计、施工到调试约需要 10 年时间，原预计于 2020 年开始建设，2030 年投产。但由于处理厂选址问题，以及当地民众协调问题，项目一直被搁置。

3 乏燃料后处理领域市场空间测算

中国核电站自 1994 年第一座秦山核电站开始运营，至今已积累了较大规模的乏燃料。随着中国“双碳”目标的公布，核能作为清洁能源备受关注和重视。这里，我们对未来乏燃料后处理的市场规模做如下测算：

装机容量的测算：

根据《中国核能发展报告 2021》，2020 年，我国商运核电机组达到 48 台，总装机容量为 4988 万千瓦，装机量仅次于美国、法国，位列全球第三，核电总装机容量占全国电力装机总量的 2.27%。截至 **2021 年 9 月 30 日，我国运行核电机组共 52 台**（不含台湾地区），比 2020 年新增 4 台，装机容量为 5349 万千瓦（额定装机容量）。随着 2022 年 1 月 1 日国内第二台华龙一号机组福清核电站 6 号机组并网发电，**我国并网发电机组达到 53 台，总装机容量 5463.695 万千瓦**，仅次于美国的 93 台 9552.3 万千瓦和法国的 56 台 6137 万千瓦，继续位居世界第三位。

根据《“十四五”规划和 2035 远景目标纲要》，至 **2025 年，我国核电运行装机容量达到 7000 万千瓦**，在建装机规模接近 4000 万千瓦。**到 2035 年，我国核电在运和在建装机容量将达到 2 亿千瓦左右**，发电量约占全国发电量的 10% 左右。则按照 2021 年年底 5349 万千瓦装机容量计算，2022-2025 年装机容量 CAGR 为 **6.96%**，假设“十四五”期间，我国核电装机容量按照该增速保持匀速增长，可以分别测算出 2022-2025 年每年装机容量。

由于纲要中并未明确给出 2035 年在运装机容量的目标 这里保守估计 假设 2025-2035 年核电运行装机容量 CAGR 为 5%。

乏燃料产量测算：

据华经产业研究院数据，截至 **2020 年中国乏燃料累积待处理乏燃料 8718 吨**，另据头豹研究院数据，**每 100 万千瓦核电设备容量的乏燃料年产量约为 21 吨**，据此，可以大致测算出，**到 2025、2030、2035 年，乏燃料年产量将分别达到 1470 吨、1876 吨、2394 吨**，累计产量将分别达到 1.52 万吨、2.37 万吨、3.46 万吨。

根据《中国经营报》，中国目前的核电站是按照自身可以存储 10 年乏燃料设计。假设 100 万千瓦核电机组对应 20 吨/年乏燃料产量计算，则每建造 100 万千瓦机组，对应增加 200 吨乏燃料储存能力。据此，我们可以根据每年的装机容量大致测算出相对应地乏燃料储存能力。**根据我们的测算，到 2025 年，即装机容量达到 7000 万千瓦时，我国核电站乏燃料储存能力将出现饱和**。因此，**虽然乏燃料储存能力随核电装机容量增加而增加，但乏燃料累计的速度要高于贮存能力的增速**。由此可见，乏燃料后处理的刚性需求，与乏燃料后处理产能之间的矛盾日益突出，因此乏燃料后处理项目的确定性较高。

表 1：“十四五”~“十六五”期间乏燃料产量测算

年份	2020	2021	2022E	2023E	2024E	2025E	2030E	2035E
装机规模（万千瓦）a	4988	5349	5721	6119	6545	7000	8934	11402
乏燃料产量（吨）a*21	1047	1123	1201	1285	1374	1470	1876	2394
乏燃料累计产量（吨）	8718	9841	11043	12328	13702	15172	23701	34586
核电站乏燃料储存能力（吨）a*21*10	10475	11233	12014	12850	13744	14700	18761	23945
理论上是否饱和	未饱和	未饱和	未饱和	未饱和	未饱和	饱和	饱和	饱和

资料来源：中国核能行业协会，《“十四五”规划和 2035 远景目标纲要》，民生证券研究院

而实际上，根据兰石重装 2021 年年报，目前大亚湾核电站在对贮存水池已经饱和，开始向

岭澳二期倒运；到 2025 年，预计将有超过 10 个核电站在堆贮存能力饱和。由此可见，乏燃料后处理能力的提升已经迫在眉睫。

乏燃料后处理市场空间测算：

根据以上对乏燃料产量的测算，到 2030 年，我国需要至少建成 2 座 800 吨处理厂（或等量处理能力），到 2035 年需要建成 3 座 800 吨后处理厂，才能实现乏燃料产量和后处理能力的平衡。根据《每日经济新闻》，一座 800 吨/年后处理厂建设费用约为 1500 亿元人民币。另据《Cost of Spent Nuclear Fuel Storage》，乏燃料后处理厂投资中，设备投资占比约为 50.9%。相对应地，大致可以测算出，**到 2030 年，乏燃料后处理的市场空间为 3000 亿元，其中设备投资约为 1527 亿元。到 2035 年，乏燃料后处理市场空间约为 4500 亿元，其中设备投资约为 2290 亿元。**

4 乏燃料处理工艺及相关设备

世界上运营核电的国家主要有两种乏燃料处理方式。一种是**开放式燃料循环路线**：通过简单的剪切、封装后，运往合适地点，直接深埋，目前瑞典、加拿大、西班牙、美国采取的是这种方式；另一种方法是**闭式燃料循环**，即分离乏燃料中的铀、钚等元素进行再利用，降低其活性和放射性，将高放废物进行填埋。目前法国、英国、俄罗斯、日本、印度、**中国**均采用该技术路线。

4.1 在堆储存

实际上，在进行最终填埋，或者乏燃料处理前，还有一种临时的处理方式，即在**反应堆内临时储存**。一般核电站都配有乏燃料贮存水池，用于临时存放从堆芯中卸出的乏燃料，换料时要装入的新燃料也暂存在其中。由于乏燃料仍会产生衰变热，且具有放射性，因此需要放入水中进行冷却和屏蔽。乏燃料在核电站存放一定时间后，定期从电厂装船运至乏燃料后处理厂，进行再回收利用。除反应堆厂房内的乏燃料水池外，电厂有一个乏燃料集中存放点，以扩展电厂的乏燃料存储能力。

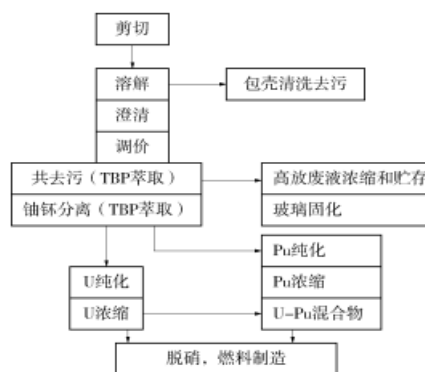
不过，随着机组运行周期增加，水池的负荷也会达到上限。据前瞻产业研究院，**一般核电站的服役年限为 40-60 年，在堆贮存水池的设计容量为 10-20 年乏燃料卸出量，而乏燃料在堆贮存 3-5 年后可以进行外运、离堆贮存、后处理。**

图 5：乏燃料水池



资料来源：中国核工业科技馆，民生证券研究院

图 6：PUREX 技术后处理流程示意图



资料来源：《乏燃料后处理产业的市场前景及发展路径》，民生证券研究院

值得注意的是，目前我国核电站大多集中于东部沿海地区，而乏燃料后处理体系则位于我国西北地区，因此，随着核废料的累积，**乏燃料离堆储运**是重要的发展方向。根据法国阿海法建设经验，大型乏燃料转运枢纽的建设设计基础设施建设、特种车辆、指挥应急等多个层面，涉及面广，周期近 10 年。

乏燃料需要由专业的公司负责储存和运输，国内仅有中核清原环境技术工程公司被授权专业从事放射性物质（含放射源、放射性废物、乏燃料等）运输、处置等业务。我国从 2003 年起首次开始乏燃料运输，综合采用海路、铁路、公路运输相结合的方式，整个运输过程中需要严格控制核辐射量，这就要求运输容器有足够的安全性和屏蔽辐射能力。

设备方面，在运输过程中，除中间贮存设施外，**储运罐 (Cask)** 是必不可少的设备。乏燃料储运容器可以分为金属容器、混凝土容器两种。**1) 金属容器**：依靠厚壁金属来屏蔽乏燃料的辐射，依靠惰性气体对流自然循环冷却，最初是用于乏燃料的运输，金属容器贮存年限一般长达 50-100 年，具有较好的安全性。该容器是一种圆筒形夹层结构。主要由内、中、外壳，伽马、中子

屏蔽层,顶盖、底板,吊耳轴、翻转耳轴,顶法兰(顶环)、“O”型密封圈组成。其筒体材质主要为低合金钢,伽马屏蔽材质主要为铅,中子屏蔽材质主要为水。**2) 混凝土容器**:相比金属容器成本大大降低,但安全性较差。国际上典型技术代表主要有 NUHMOS 和 HI-STORM。NUHMOS 系统由钢筋混凝土水平贮存模块、不锈钢干式屏蔽罐组成,运作时由转运设备将干式屏蔽罐从核电站厂房运到水平贮存模块贮存。

虽然储运罐应用迫切,附加值高,但由于单台设备寿命极长,且研发难度较大,市场空间有限,因此布局储运罐的企业数量也较为有限。目前,**西安核设备有限公司**承担研制乏燃料运出容器的样机工作,**上海阿波罗机械**与**阿海珐 TN**联合生产干式储存金属内胆样机。

不过,我国乏燃料运输容器尚不具备批量生产及应用的能力。目前国际上主要产品来自美国 NAC-STC、日本日立、西班牙 ENSA。根据立鼎产业研究网,我国**现在采用的乏燃料运输容器为从美国采购的 NAC-STC 型(两台,单台价格 3,000 万美元)和 Hi-star 60 型商业压水堆乏燃料运输容器**,单台容量分别为 26 组、12 组。

4.2 PUREX 技术及装备

我国选择乏燃料后处理技术路线已成定局。目前,包括我国在内的大多数国家,尚未形成规模化乏燃料后处理能力,只能先采取在堆贮存、离堆贮存的暂存方式作为缓冲。不过,当前我国在堆贮存和离堆贮存能力均已趋于饱和,乏燃料处理将成为制约核电发展的重要因素。在《核电中长期发展规划(2005-2020 年)》中,我国再次重申了核燃料闭式循环和乏燃料后处理的政策。

PUREX 是目前乏燃料后处理的主流技术路线。乏燃料后处理厂具有较高的技术难度,处理技术又可以分为干法、湿法两种。其中以磷酸三丁酯(TBP)为萃取剂的是法处理 PUREX(萃取回收 Pu 和 U 的英文缩写)是目前最成熟的主流技术,也是位移实现商业化的技术路线,法国、日本均采用这种方法。

根据《乏燃料后处理产业的市场前景及发展路径》,PUREX 的工艺流程主要包括对乏燃料的剪切、剪切片的硝酸溶解、溶剂萃取分离裂变产物、溶剂萃取分离提纯 U 和 Pu、脱硝、送往燃料制造厂制造新燃料整个闭式循环。萃取后的高放废物需要进行贮存和玻璃固化,被分离的核裂变产物作为高放废液进行处理。

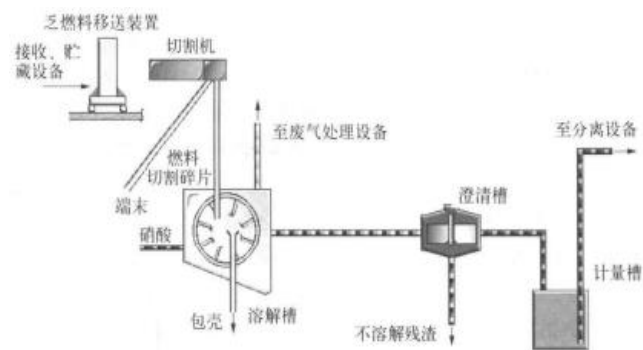
乏燃料后处理按照工序可以分为**首端处理、萃取分离与尾端处理**。

4.2.1 首端处理

首端处理主要供需包括乏燃料组件的切割、去包壳、燃料芯块溶解、过滤、调料、尾气处理。PUREX 技术采用切断-浸取(chop & leaching)法,即适用**剪切机**将燃料组件剪成两端裸露燃料芯块的短棒,落入预先装有硝酸溶液的溶解槽中,并顺利排出产品液、废气、废包壳、残渣等。

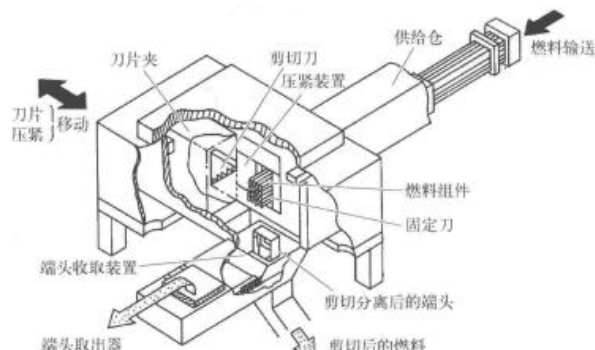
乏燃料的**溶解器**有几点要求,需要能够顺畅加入乏燃料和溶剂,并保持二者之间有良好的接触,能够可靠地控制溶解速度,并将废弃物和溶解产品液顺利排出。国际上后处理厂采用篮筐式间歇溶解器、连续溶解器等。

图 7：乏燃料后处理的首端过程（日本六所村后处理厂）



资料来源：《最新核燃料循环》，民生证券研究院

图 8：多齿棒束剪切机

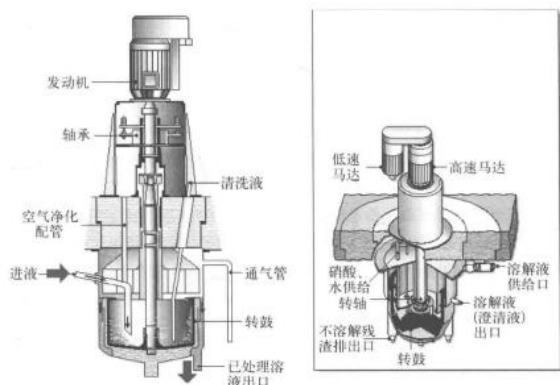


资料来源：《最新核燃料循环》，民生证券研究院

由于溶解产品中含有少量 SiO_2 和其他胶体沉淀，由于胶体颗粒极细小，因此直接过滤不能有效去除，需要加入絮凝剂可使其凝聚成絮状物，并通过高速离心澄清机，或脉冲过滤器除去溶解液中悬浮的絮状固体杂质。

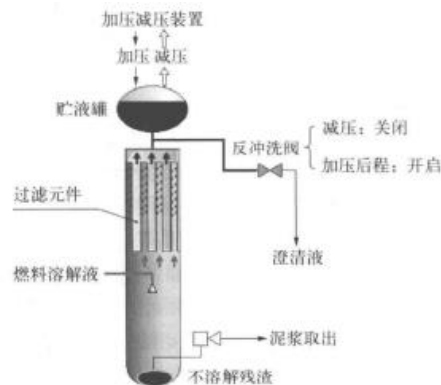
至此，首端工序中经离心分离器等设备处理的溶解液，被送到下道工序制备萃取料液，调制的工序称为料液配置（调料）。而废包壳碎片、某些不溶残渣、微量铀、钚等则被陆续分离出来。其中，废包壳被送去检测残余放射性元素含量，合格后作为固废处理，而微量铀、钚元素则进行专门处理，进行回收。

图 9：离心澄清机



资料来源：《最新核燃料循环》，民生证券研究院

图 10：脉冲过滤器



资料来源：《最新核燃料循环》，民生证券研究院

溶解过程中排放的尾气进入周围环境会使人体遭受放射性内外照射的危害，这些物质通常以小液滴、气溶胶、挥发气体等形式存在。由于存在形式不同，因此需要采用多种方法处理为其，采用各种洗涤器、气液分离器，以及性能各异的高效过滤器等。

4.2.2 萃取分离及净化

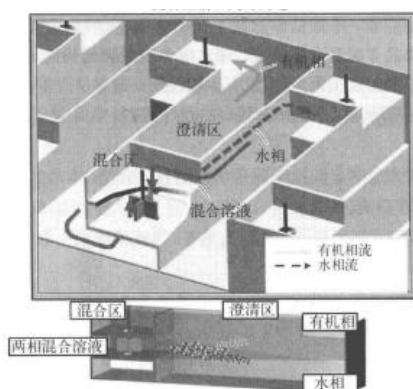
萃取分离工序的目的，主要在于铀、钚与放射性裂变产物的分离和净化。在这一步中，铀、钚的纯化和分离，取决于在不同条件下，氧化态的铀、钚、裂变元素在两相间的分配系数差异，即萃取剂磷酸三丁酯（TBP）对这些金属离子的萃取能力不同。

在核燃料后处理过程中，通常所说的溶剂均指油机溶液，如磷酸三丁酯（TBP）-煤油溶液等，溶质包括铀、钚、钚、裂变元素、硝酸等。在萃取过程中，由于一级堆区平衡得到的萃残液中还含有部分被萃取成分，为了进一步提纯，可以采用多级连续萃取方式，即串联若干个淡季萃取设

备进行**多级萃取**。需要用到的设备包括**混合澄清槽**（mixer-setter）、**离心萃取器**（centrifugal extractor），或**脉冲萃取柱**（pulsed-column）。

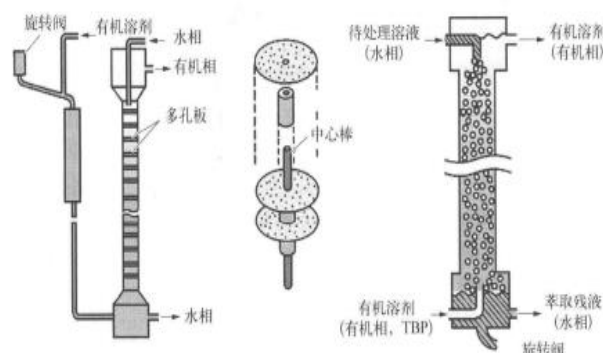
任何一个萃取过程都包括两相溶液混合、澄清分相两个过程。因此，**混合澄清槽**，顾名思义就是在这种设备中进行这两个过程，可以按顺序先后间歇进行，也可以分别在相连的混合设备、澄清设备内连续进行。混合澄清槽是一种箱式萃取设备，由混合室、澄清室两部分组成，在混合室中借助机械或空寂脉冲搅拌作用，使有机相和水相充分混合，澄清室中利用二者的密度差使其分离。1929年，Holley和Mott研制了第一个混合澄清其单元，因此混合澄清槽也是最早、最广泛应用的一种萃取设备。其优点是，**设备高度低，结构简单，操作可靠，适应性强**，但缺点是**物料在槽内滞留量大，停留时间长，因此溶剂受辐射影响降解严重**，界面污物难以排除。

图 31：混合澄清槽内部构造



资料来源：《最新核燃料循环》，民生证券研究院

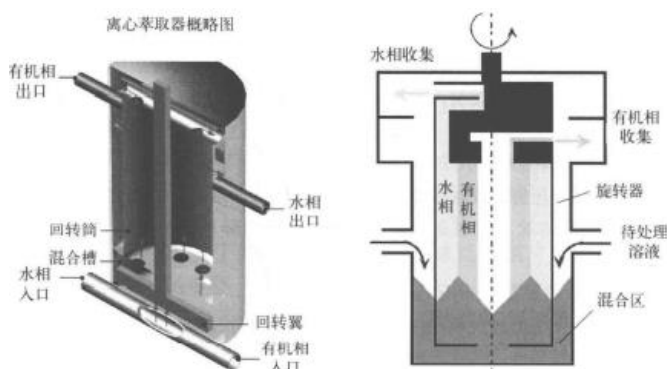
图 14：脉冲萃取柱内部构造



资料来源：《最新核燃料循环》，民生证券研究院

脉冲萃取柱是后处理中另一种常用的萃取设备，其有点事结构简单更加简单，存留量小，物料停留时间较短，缺点是设备室较高，而且适应性稍差，操作控制要求较严格。脉冲萃取柱的主体是圆柱形筒体，中间有若干块带孔的筛板，筛板是两相混合进行传质的区域，分散相液通过筛板时被粉碎成小液滴，加剧两相的湍动程度。目前，法国 UP2、UP3 厂，日本的六所村后处理厂一玄幻攻取五柱都选用了脉冲萃取柱。

图 13：离心萃取器构造图



资料来源：《最新核燃料循环》，民生证券研究院

随着不同堆型发展，后处理对象中出现了许多高浓铀、高燃耗、高钷量的乏燃料原件。燃耗加深和易裂变含量的增加，导致的最主要问题就是溶剂辐照损伤和核临界安全。**离心萃取器**具有短的停留时间和较小的村流量，能在很大程度上同时满足对两个安全问题的处理能力，因而目前各国力求开发应用离心萃取器。但这种设备结构复杂，制造费用较高。

目前，多数后处理厂综合应用脉冲柱和混合澄清槽，在铀、钚共萃取、钚精华、反萃等放射性强、维修困难的工序采用脉冲萃取柱，在铀净化、反萃和污溶剂再生等工序多采用混合澄清槽。而对于能耗深、燃料富集度搞得堆型，多使用离心萃取器。三类设备格局特点，在使用时根据具体处理对象和经济条件选择。

工业规模实现铀、钚分离主要使用**还原分离法**。化学分离法又可以分为化学试剂还原法、电解（电化学）还原法。目前世界上许多国家乏燃料后处理厂普遍使用亚铁离子还原法。还原后的铀、钚元素需要进一步进行净化。铀的**净化循环**的主要任务是对已初步分离铀溶液，进一步萃取和洗涤，除去钚和裂变元素，而钚的**净化循环**则是对初步分离的钚中间产品液进一步萃取分离，两个过程中都涉及到此前提及的萃取器。至此，铀、钚元素的萃取和化学分离基本完成。

4.2.3 尾端处理

经溶剂萃取分离和净化得到的铀、钚中间产品，不论在纯度和形态上，都无法满足应用的要求。因此，在铀、钚主体萃取净化后，仍需**纯化**，以进一步除去钚中的杂质，转化成金属钚或稳定的化合物。从铀或钚中间品进行补充净化、浓缩以及转化为最终产品形态的一整套工艺步骤，成为**尾端处理**。

铀的尾端处理包括**纯化、转化**两道工序。1) 纯化工序可以增设 TBP 萃取纯化循环，也可以使用**硅胶吸附**。由于硅胶吸附流程操作简单，投资也较少，且能满足最终纯化要求，因此在生产中被广泛应用，涉及到的装置主要有**硅胶吸附塔、硅胶吸附床**。2) 转化工序可以分为湿法、干法两种。湿法即选择合适的沉淀剂，将铀沉淀下来，在经过过滤、干燥、加热分解制成铀的氧化物。干法则是将硝酸铀酰水溶液浓缩在浓硫酸中，再还原成二氧化铀，转化为四氟化铀或金属，涉及到的装置主要有**搅拌床、流化床**。

钚的尾端处理也包括纯化、转化两道工序。1) 钚的纯化常使用阴离子交换纯化钚法，利用的原理是钚元素可与硝酸根生成稳定的络阴离子，被阴离子交换树脂吸附，而铀元素生成络阴离子的能力较弱。2) 后处理厂钚的尾端可获得纯净的硝酸钚溶液，根据《最新核燃料循环》，如果将硝酸钚转化为固体二氧化钚，其贮存的经济性、安全性都要由于前者，因此大多数后处理厂都建立了**将硝酸钚转化为二氧化钚的装置**。目前，各国后处理厂多采用**沉淀、煅烧**的方法生产二氧化钚。

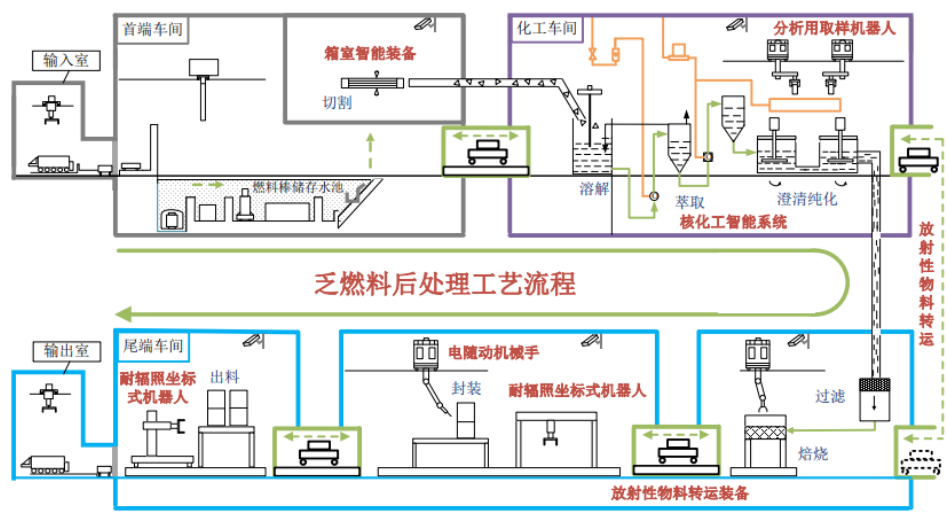
总体上看，目前我国后处理产业已实现部分设备国产化，进入核电市场推广阶段，如**中子吸收材料、常规机械电气设备**。部分产品需要在现有核电基础上进行适应性开发或改进，如**远距离操作阀门、机械手、热室**等。然而，PUREX 技术的工艺流程**主设备技术难度较高，国产化仍然任重道远**。例如，**剪切机、溶解反应器、离心澄清器、脉冲过滤器、萃取分离器、玻璃固化装置**等。

5 相关标的

5.1 景业智能

景业智能主要从事特种机器人及智能装备的研发、生产及销售，其核工业产品产品包括核工业系列机器人、核工业智能装备等，于 2022 年 4 月 29 日在科创板上市。公司产品应用于核燃料循环产业链。公司生产的箱室智能装备、分析取样用机器人、核化工智能系统、放射性物料转运装备、电随动机械手、耐辐照坐标式机器人等可应用于乏燃料后处理的首端车间、化工车间、尾端车间。公司的核工业机器人及智能装备产品均为全自动化产品，主要在车间的热室、手套箱等放射性环境内自动运行，基本不需要人工操作，工作人员可完全隔离于辐射区外。**2021 年，公司实现营业收入 3.48 亿元，其中，3.14 亿元来自核工业产品，占营收比重 90%以上。**

图 14：景业智能核工业产品在乏燃料后处理工艺中的应用



资料来源：景业智能招股书，民生证券研究院

公司技术成果“核工业遥操作电随动机械手关键技术及重大工程应用”填补了国内空白，技术上达到国际先进水平。公司已成为国内核工业机器人及智能装备领域的重要供应商。主要客户为中核集团、航天科技集团、航天科工集团等大型央企的下属企业和科研院所。

根据景业智能招股书，2009 年我国智能设备应用在机床、仪器仪表、通用基础件、施工机械、印刷机械和石化装备等市场的比例平均数约为 20%。按该比例计算乏燃料后处理厂设备投资中现有智能装备投资，则**我国乏燃料后处理厂在 2030、2035 年智能装备投资规模将达到 305 亿元、458 亿元。**

5.2 江苏神通

江苏神通自 2008 年以来已成为我国核电阀门的主要供应商，获得 90%以上已招标核级蝶阀、核级球阀订单，研发出满足第三代、第四代核电技术要求的阀门产品，且**陆续取得乏燃料后处理项目相关的订单，产品于 2020 年下半年陆续交货。**公司自 2019 年以来分别启动乏燃料后处理关键设备研发及产业化项目一期，二期。一期研制**气动送样系统、贮存井、空气提升系统**等乏燃料后处理关键设备，走在我国乏燃料处理关键设备研发制造领域的前列，预计在上述产品领域将保持较强的领先优势。二期在此基础上拓展品类，成功实施后将形成**料液循环系统 200 套，后处理专用球阀 4,500 台/年、后处理专用蝶阀 250 台/年、后处理专用仪表阀 1 万台/年、样品**

瓶 20 万个/年的生产能力，丰富公司乏燃料后处理产品线。

2019-2020 年，公司乏燃料后处理订单分别为 0.88 亿元、2.82 亿元，**公司在首个 200 吨级后处理项目中累计获得订单 3.7 亿元。目前，公司正跟进第二套项目招投标，2021 年，公司获得 2.07 亿元订单。**乏燃料业务为公司继核电阀门后，创新研发带来的全新增量业务，预计未来将为公司在核能装备领域业绩增长带来较大促进作用。

5.3 兰石重装

兰石重装是石化装备制造领域的领先企业。目前，公司在核能装备领域产品主要有核电站压力容器、储罐（核安全 2、3 级）；核燃料贮存容器；乏燃料后处理厂**萃取设备、后处理首端专用设备、产品贮存容器、贮槽、箱室设备及蒸发器**（核安全 2、3 级）；高温气冷堆核电站乏燃料现场贮存系统、**装卸系统**及新燃料运输系统相关设备、HTL 电加热器；核电用板式换热器、微通道换热器等。

为进一步布局乏燃料领域，公司于 2021 年完成对中核嘉华 55% 股权（交易对方为金核投资）。中核嘉华前身系原四〇四厂五分厂，始建于 1959 年，主要为四〇四提供备品备件、机械加工、军工容器制造而配套建成的机械加工与维修分厂，是四〇四厂建成最早的企业。多年来，中核嘉华一直为核工业服务，随着甘肃中核技术产业园建设持续开展、核专业建设程度不断提高，中核嘉华的市场参与度也将逐渐加深，产品订单也将不断增加。目前，公司在核燃料贮存容器细分领域具有较高的市占率，制造了国内首座核电乏燃料后处理中试厂绝大多数非标设备。

本次交易完成后，中核嘉华成为兰石重装控股子公司，纳入公司合并报表范围。**2021 年，中核嘉华实现营业收入 4699 万元，净利润 576 万元。**另外，公司公告显示，金核投资作为交易对方，承诺标的公司 2022 年度、2023 年度、2024 年度实现的净利润不低于 650 万元、1550 万元、2500 万元，**三年业绩承诺期合计实现净利润不低于 4700 万元。**

未来，兰石重装将以中核嘉华为核燃料及乏燃料贮运、处理等相关装备的制造基地，重点围绕中核甘肃核技术产业园项目，承担**乏燃料现场贮存系统竖井热屏设备、装卸系统、新燃料运输系统过滤器、乏燃料运输系统地车屏蔽罩**等。此外，兰石重装也具有一定的地域优势，公司靠近甘肃的中核甘肃产业园，产业园主要建设核工业配套产业，需要大量罐、槽类压力容器，随着相关设备进入采购周期，预计中核嘉华产品订单也将不断增加。

5.4 通裕重工

通裕重工是大型铸锻件产品研发、制造的资深企业，产品包括电力（风电、水电、火电、核电）、石化、船舶、海工装备、冶金、航空航天、军工、矿山、水泥、造纸等领域，技术研发实力雄厚。公司已通过美国 ASME 核级 MO 认证，系中核集团合格供应商。公司在核电领域的产品包括**核电用水工机械、起动设备及配件、废料智能处理移动厂房**等。在乏燃料处理领域，公司已完成固态、液态核废料处理的关键路径布局，分别与核电工程公司、核动力院合作开发的**超级压缩打包生产线、含硼废液高效固化生产线**是核电站内暂存库中核废料减容、固化的两大关键设备。

2021 年，公司完成对**7T 热室数控吊车**的研发制造，该设备是乏燃料处理的核心装备，用于乏燃料后处理最关键热室-剪切热室的乏燃料吊运。该产品具有耐辐照能力强、定位精度高、稳定性好、单一冗余故障保护、可远程维修等特点，具有较好的市场推广前景。另外，公司还完成了对**放射性焚烧灰及干燥盐收集、转运系统**的研发，该系统设备用于核燃料后处理工业示范厂可燃废物焚烧设备和超压系统中盛装焚烧炉系统产生的焚烧灰渣和流化床干燥系统产生的干燥盐通过焚烧炉系统的接收、计量和转运，是由取封盖、计量工作箱等 10 余台设备组成的，集气动、电动于一体的自动化生产线。

2021年，公司核电业务收入5389万元，同比增长111%，较过去几年有了明显上升。虽然目前核电业务收入占公司营收比重有限，2021年收入占营收比重为0.94%，但随着乏燃料项目推进，公司核电业务有望进入发展快车道。

5.5 应流股份

应流股份是专用设备零部件生产领域内的领先企业，主要产品为泵及阀门零件、机械装备构件，应用在航空航天、核电、油气、资源及国防军工等领域。公司生产的主泵泵壳经鉴定使用寿命达60年，目前“华龙一号”主泵泵壳100%由应流生产。

图 55：第三代新乏燃料贮存格架



资料来源：应流股份官网，民生证券研究院

图 16：中子吸收版



资料来源：应流股份官网，民生证券研究院

在乏燃料领域，公司生产的**第三代核电燃料贮存格架**，用于储存新燃料或乏燃料的重要设备，设计寿命60年，采用可靠结构设计和高效屏蔽中子材料组合。目前，山东海阳、浙江三门、广东陆丰核电站均在使用应流生产的贮存格架。此外，公司还具备**中子吸收板**批量生产能力，可用于不同堆型的新燃料、乏燃料贮存设备中。目前，公司生产的中子吸收板已完成材料可靠性试验，满足60年使用寿命，已在山东海阳核电站、国内某可研、国防装置中均有应用。

6 风险提示

1) 订单取得不连续导致业绩波动的风险。乏燃料后处理领域产品需求具有定制化、小批量的特点,如果企业取得订单受到客户预算、采购时间及相关项目进展等多重因素影响具有一定的波动性和不连续性。同时,由于部分合同金额大且实施周期长,也具有一定的不确定性。因此订单去的不连续将会一定程度上影响公司营收。

2) 乏燃料项目推进不及预期风险。乏燃料后处理项目资金投入大,技术难度也较大,目前已经投入运营的只有 50 吨的小型示范项目,成功先例较少,尚未形成一定规模。若受到资金支持不足,或受到选址所在地居民反对等不确定性因素影响,或导致乏燃料项目推进进度延迟,进而影响相关企业订单和收入的确认。

3) 客户集中度较高的风险。乏燃料处理承包单位主要为中核集团下属单位。若企业无法持续获得中核集团的合格供应商认证并持续获得订单,则经营将受到不利影响。此外,若中核集团下属单位中存在研发与上游设备企业类似的产品或已有一定的研发成果,或对上游设备企业的业务获取以及经营情况带来不利影响。

插图目录

图 1：核燃料循环示意图.....	4
图 2：乏燃料的构成.....	4
图 3：2013-2020 年中国乏燃料产量及累积情况.....	5
图 4：2011-2020 年政府性基金乏燃料处理处置支出.....	5
图 5：乏燃料水池.....	8
图 6：PUREX 技术后处理流程示意图.....	8
图 7：乏燃料后处理的首端过程（日本六所村后处理厂）.....	10
图 8：多齿棒束剪切机.....	10
图 9：离心澄清机.....	10
图 10：脉冲过滤器.....	10
图 11：混合澄清槽内部构造.....	11
图 12：脉冲萃取柱内部构造.....	11
图 13：离心萃取器构造图.....	11
图 14：景业智能核工业产品在乏燃料后处理工艺中的应用.....	13
图 15：第三代新乏燃料贮存格架.....	15
图 16：中子吸收版.....	15

表格目录

表 1：“十四五”~“十六五”期间乏燃料产量测算.....	6
-------------------------------	---

分析师承诺

本报告署名分析师具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格并登记为注册分析师，基于认真审慎的工作态度、专业严谨的研究方法与分析逻辑得出研究结论，独立、客观地出具本报告，并对本报告的内容和观点负责。本报告清晰准确地反映了研究人员的研究观点，结论不受任何第三方的授意、影响，研究人员不曾因、不因、也将不会因本报告中的具体推荐意见或观点而直接或间接收到任何形式的补偿。

评级说明

投资建议评级标准	评级	说明
以报告发布日后的 12 个月内公司股价（或行业指数）相对同期基准指数的涨跌幅为基准。其中：A 股以沪深 300 指数为基准；新三板以三板成指或三板做市指数为基准；港股以恒生指数为基准；美股以纳斯达克综合指数或标普 500 指数为基准。	推荐	相对基准指数涨幅 15%以上
	谨慎推荐	相对基准指数涨幅 5%~15%之间
	中性	相对基准指数涨幅-5%~5%之间
	回避	相对基准指数跌幅 5%以上
行业评级	推荐	相对基准指数涨幅 5%以上
	中性	相对基准指数涨幅-5%~5%之间
	回避	相对基准指数跌幅 5%以上

免责声明

民生证券股份有限公司（以下简称“本公司”）具有中国证监会许可的证券投资咨询业务资格。

本报告仅供本公司境内客户使用。本公司不会因接收人收到本报告而视其为客户。本报告仅为参考之用，并不构成对客户的投资建议，不应被视为买卖任何证券、金融工具的要约或要约邀请。本报告所包含的观点及建议并未考虑个别客户的特殊状况、目标或需要，客户应当充分考虑自身特定状况，不应单纯依靠本报告所载的内容而取代个人的独立判断。在任何情况下，本公司不对任何人因使用本报告中的任何内容而导致的任何可能的损失负任何责任。

本报告是基于已公开信息撰写，但本公司不保证该等信息的准确性或完整性。本报告所载的资料、意见及预测仅反映本公司于发布本报告当日的判断，且预测方法及结果存在一定程度局限性。在不同时期，本公司可发出与本报告所刊载的意见、预测不一致的报告，但本公司没有义务和责任及时更新本报告所涉及的内容并通知客户。

在法律允许的情况下，本公司及其附属机构可能持有报告中提及的公司所发行证券的头寸并进行交易，也可能为这些公司提供或正在争取提供投资银行、财务顾问、咨询服务等相关服务，本公司的员工可能担任本报告所提及的公司的董事。客户应充分考虑可能存在的利益冲突，勿将本报告作为投资决策的唯一参考依据。

若本公司以外的金融机构发送本报告，则由该金融机构独自为此发送行为负责。该机构的客户应联系该机构以交易本报告提及的证券或要求获悉更详细的信息。本报告不构成本公司向发送本报告金融机构之客户提供的投资建议。本公司不会因任何机构或个人从其他机构获得本报告而将其视为本公司客户。

本报告的版权仅归本公司所有，未经书面许可，任何机构或个人不得以任何形式、任何目的进行翻版、转载、发表、篡改或引用。所有在本报告中使用的商标、服务标识及标记，除非另有说明，均为本公司的商标、服务标识及标记。本公司版权所有并保留一切权利。

民生证券研究院：

上海：上海市浦东新区浦明路 8 号财富金融广场 1 幢 5F； 200120

北京：北京市东城区建国门内大街 28 号民生金融中心 A 座 18 层； 100005

深圳：广东省深圳市深南东路 5016 号京基一百大厦 A 座 6701-01 单元； 518001