

液化天然气冷能利用进展

Advances of LNG Cold Energy Utilization

林文胜

上海交通大学制冷与低温工程研究所

北京 · 2024-04-09



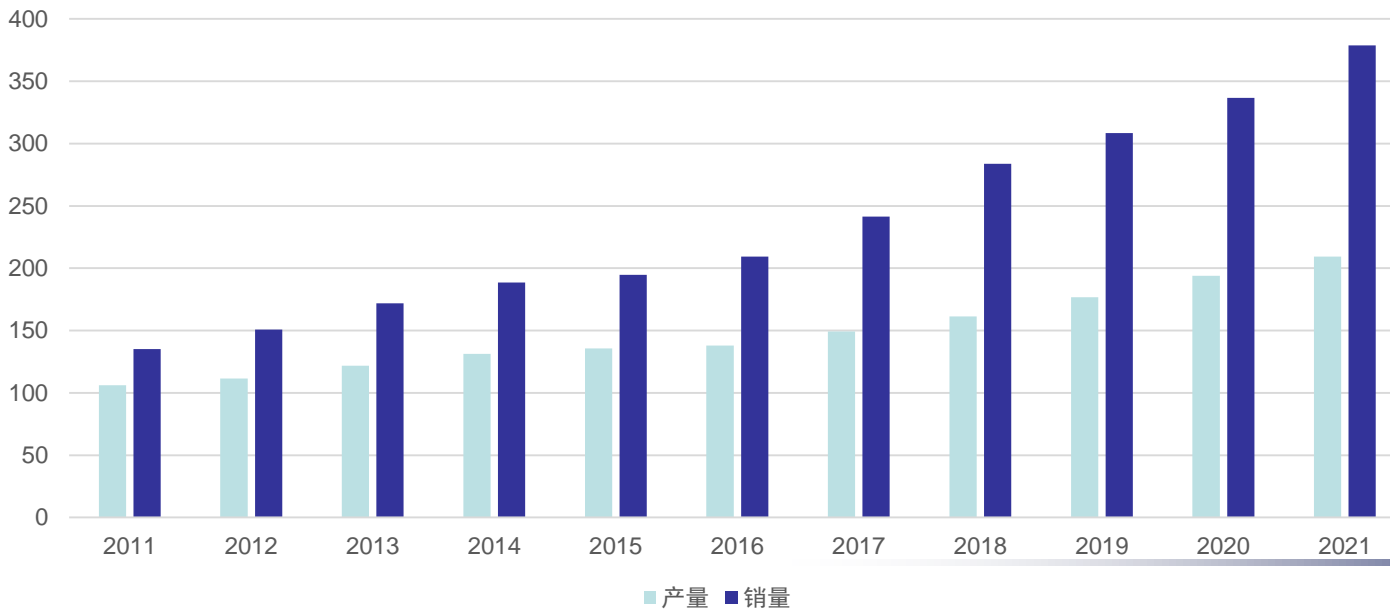
- 一、LNG冷能概述
- 二、LNG冷能利用工程进展
- 三、LNG冷能利用研究进展



一、LNG冷能概述

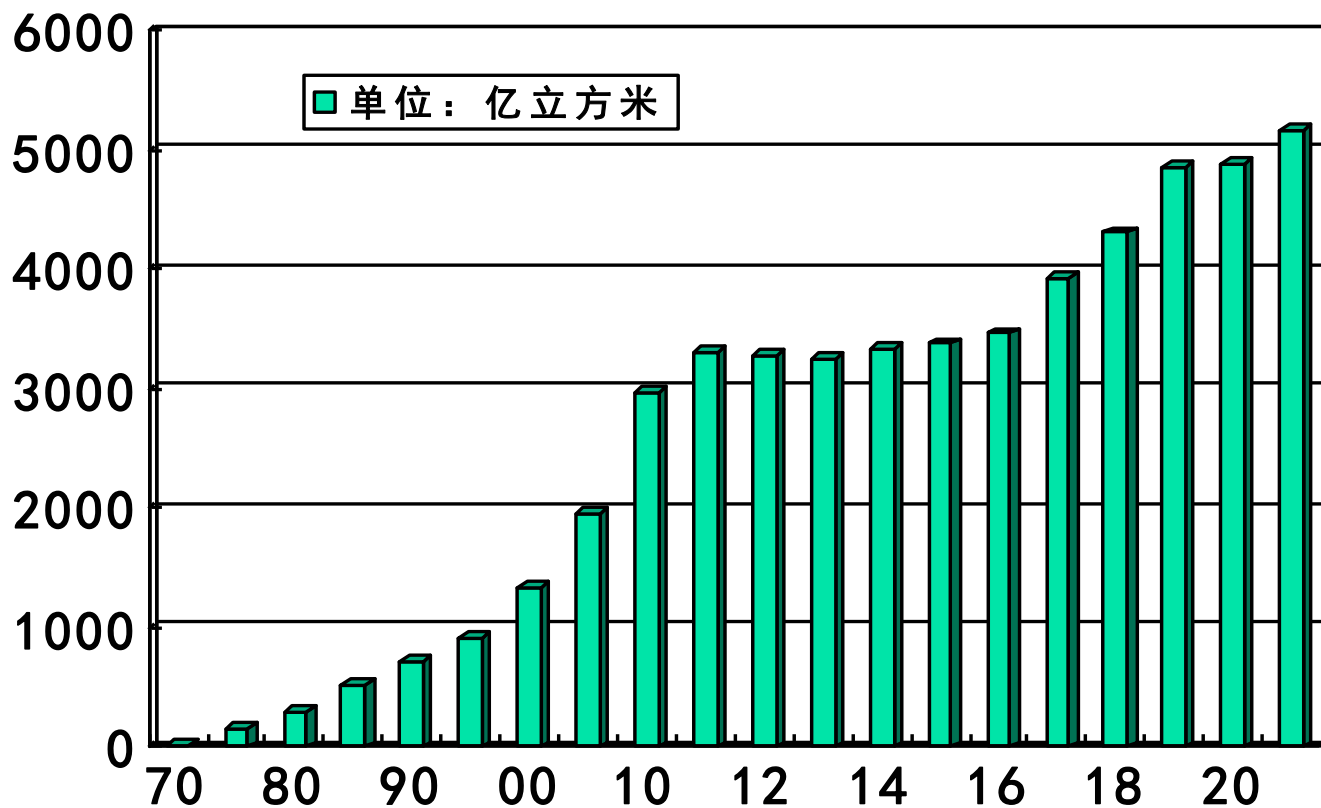
- 2021年中国天然气产量2092亿立方米（占世界5.2%），消费量3787亿立方米（世界9.4%）。进口占比44.8%（2018年中国超过日本成为**世界第一大进口国**）
- 2021年产销量同比分别增长8.1%和12.8%，2011-2021年均分别增长7.0%和10.9%

天然气产销量(bcm)



液化天然气贸易量

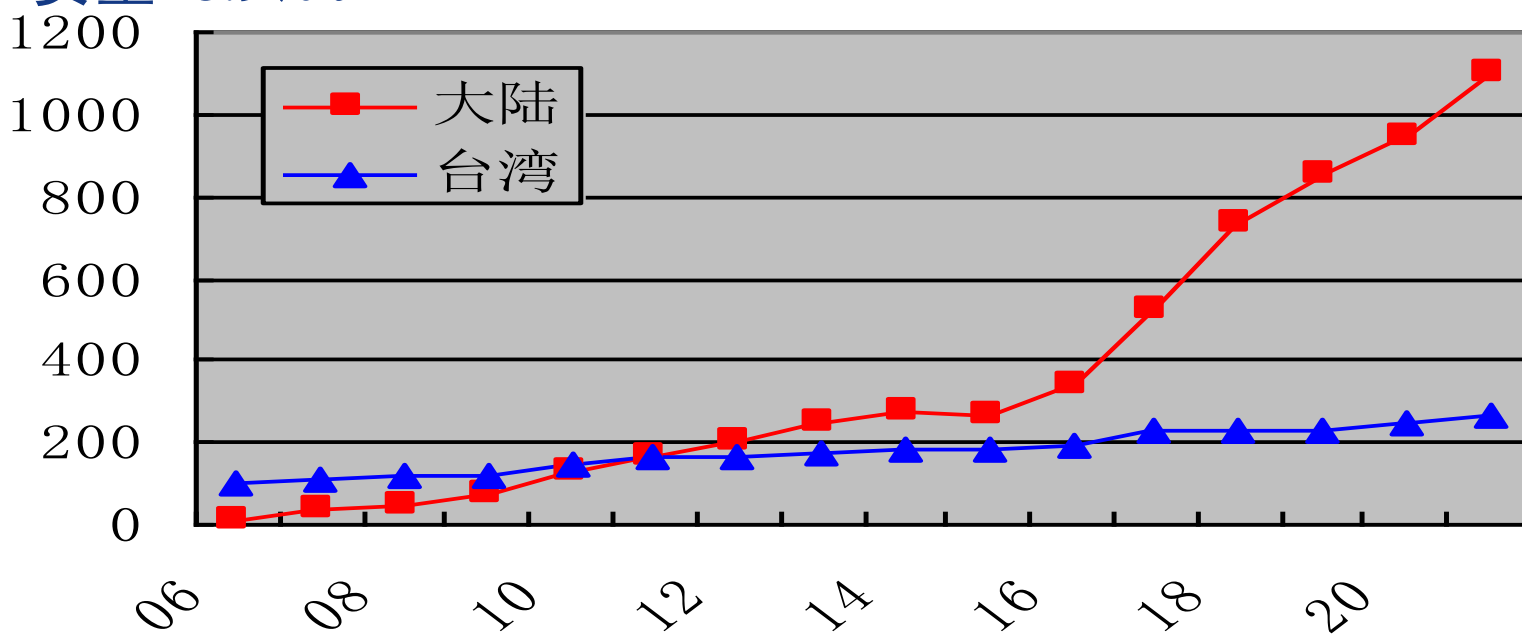
- 2021年LNG国际贸易量已达5162亿m³，占世界天然气国际贸易总量的**50.5%**（2020年占比**首次超过50%**）。



世界LNG贸易量

液化天然气贸易量

- 中国大陆从2006年开始进口LNG，几年就成为世界第三大进口国，2017年超过韩国成为世界第二大进口国，2021年超过日本成为**世界第一大进口国**。
- 2021年进口量达到1095亿m³，同比增长16.8%，2011-2021年均增长20.6%，占世界21.2%。占中国天然气消费量28.9%。



中国LNG进口量（亿立方米）

- ① LNG
 - 低温液态天然气
 - 常压沸点为 -162°C (111K)
- ② LNG蕴含巨大的冷能，约830MJ/t

① 一座3Mt/a的LNG接收站

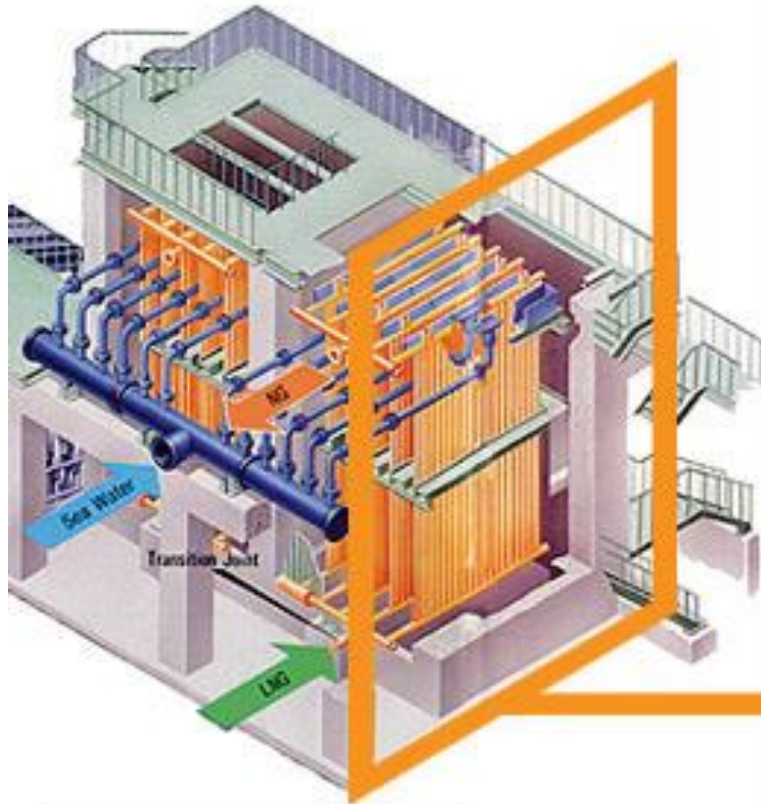
- LNG连续均匀气化释放的冷量约**80MW**
- 全年释放LNG冷能总量约70万MWh，或**7亿kWh**
- **以焓表达**，约36MW，或3亿kWh

② 如果冷能发电焓效率50%

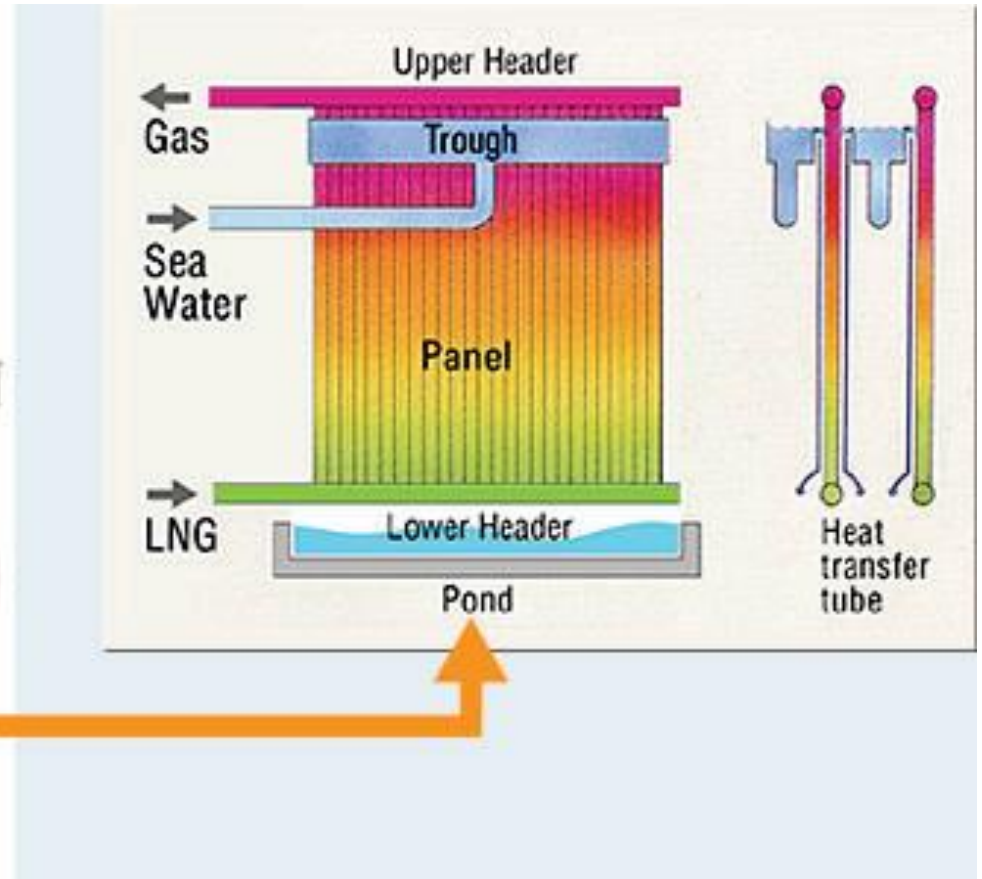
- 发电功率为**18MW**
- 发电量（即节能）**1.5亿kWh/a**
- 考虑常规电厂效率50%，可**减排CO₂0.36亿t/a**

日本几个LNG接收站，焓利用率50~60%，回收焓率5~25%。
另，按0.4kWh/kg计算，一座3Mt/a的LNG液化厂耗电12亿kWh/a

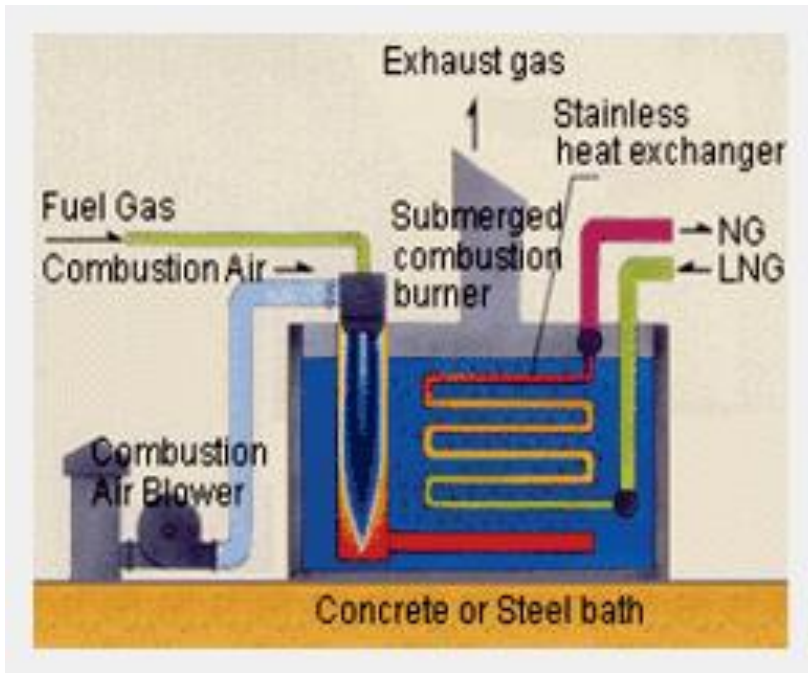
ORV - No



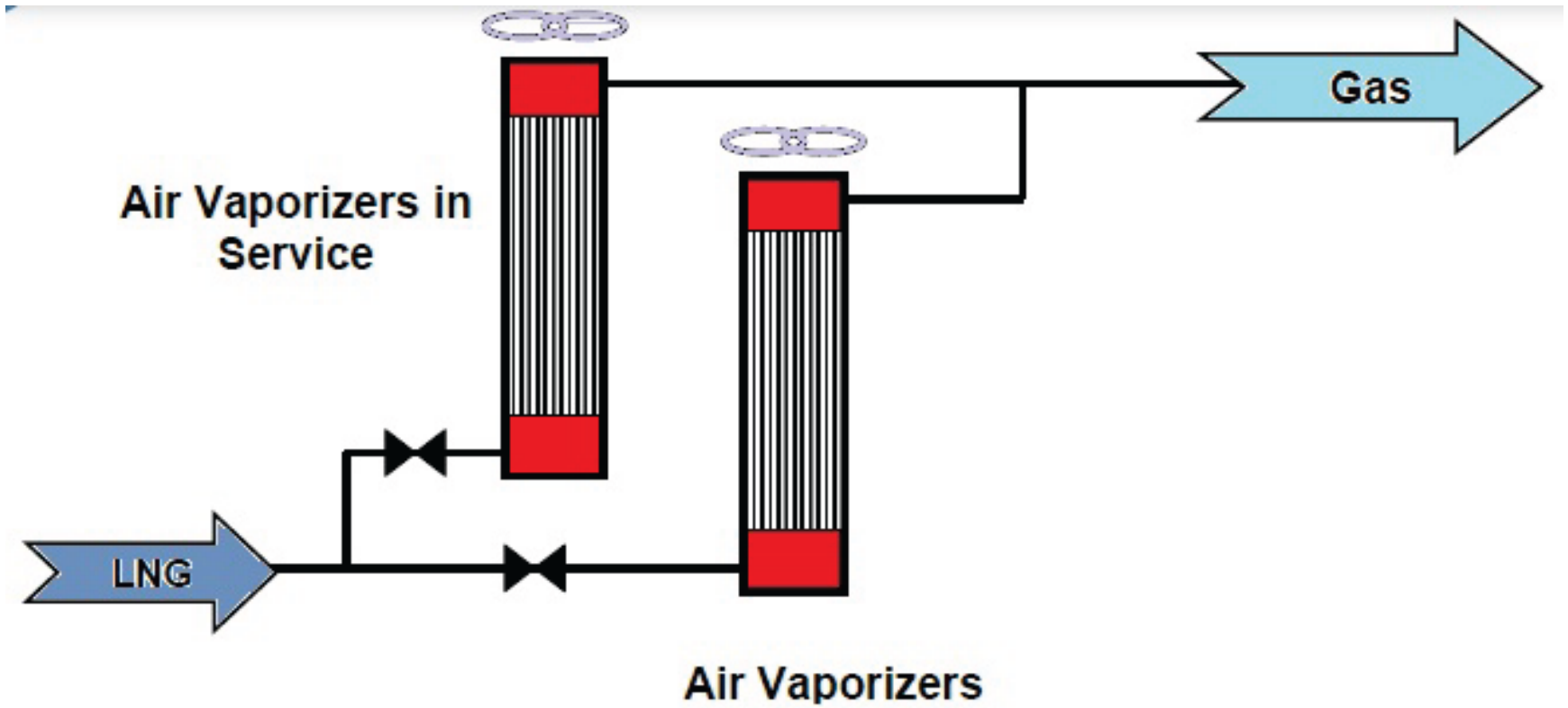
Bird's-eye view of the ORV



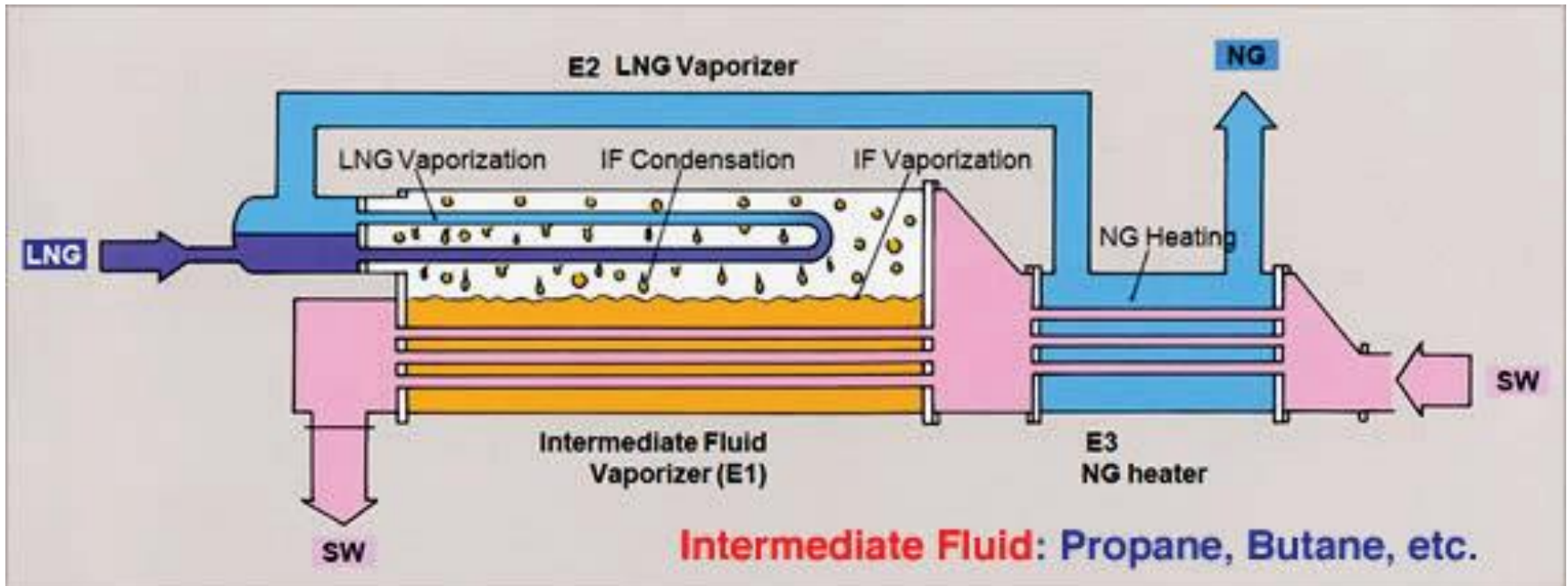
SCV - No



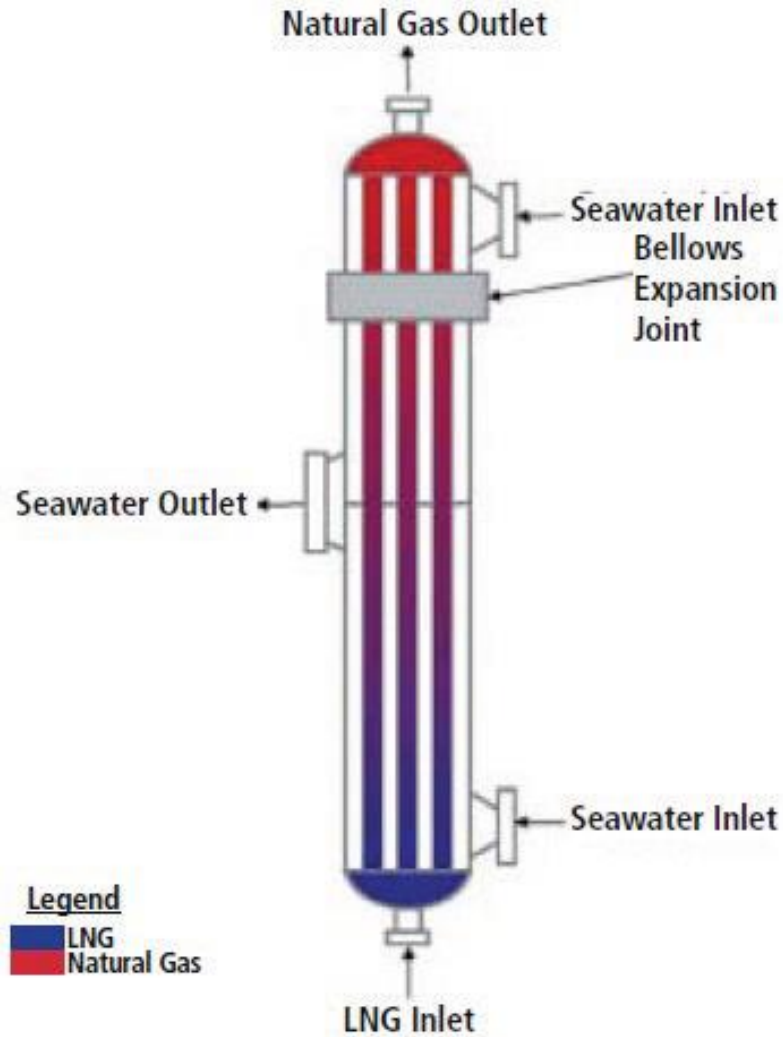
AAV - No



IFV – No / Yes



STV – Yes!



LNG冷能利用技术

LNG Cold

LNG冷能利用相关行业示意图

直接利用

空气液化分离

冷能发电

CO₂液化及干冰

冷冻仓储

空调冰水

低温养殖及植栽

丁基橡胶合成业

乙烯工厂

氢气液化

液氮

液氧

液氩

冷冻干燥

冷冻食品

餐饮业

低温粹化

电化学业

饮用水纯

化
废水处理

炼钢业

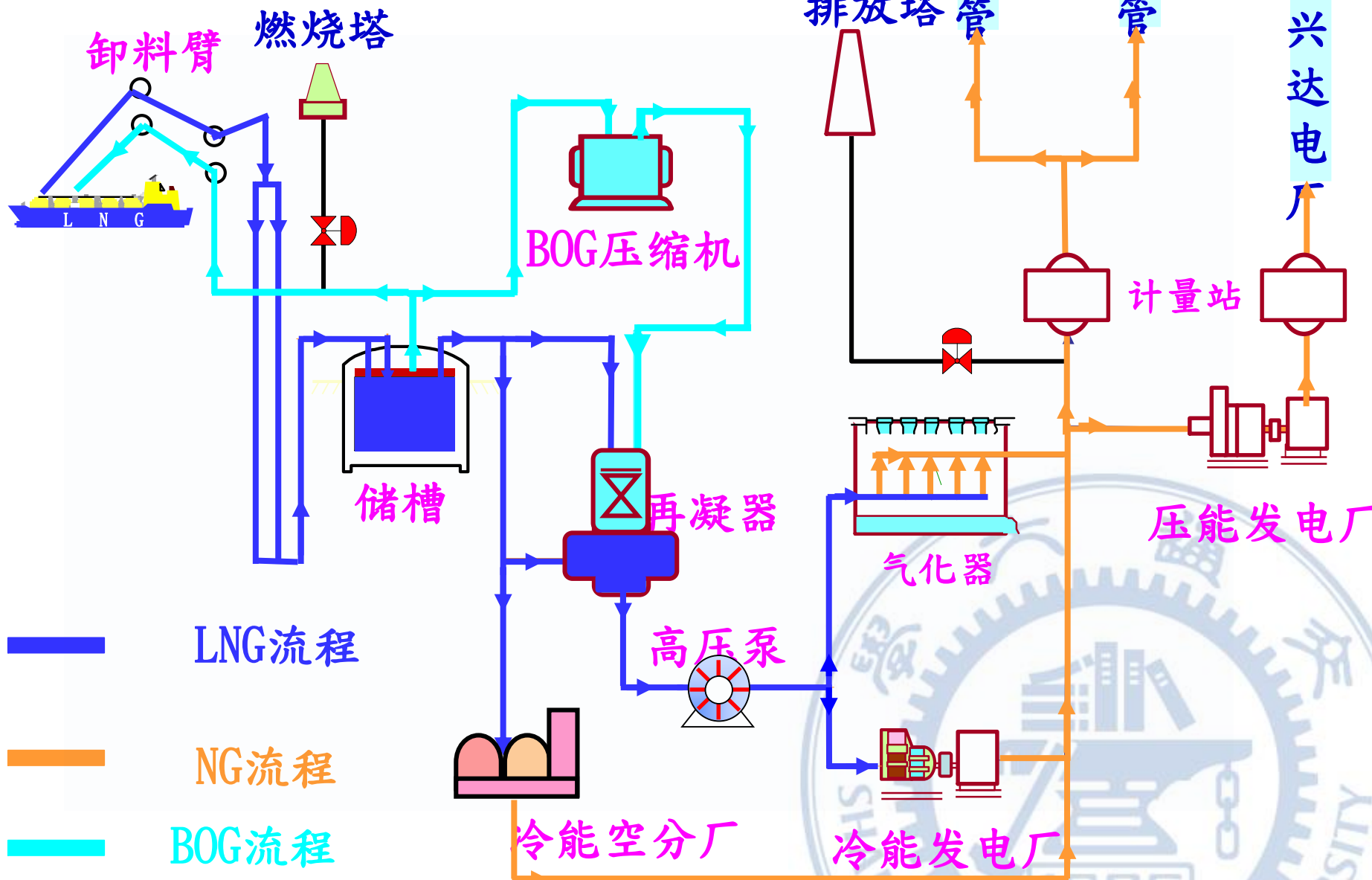
金属加工

造船业

制铁工业

焊接业

间接利用



中国台湾永安LNG接收站冷能利用概览



2.1 空分

2.2 低温发电

2.1 空分

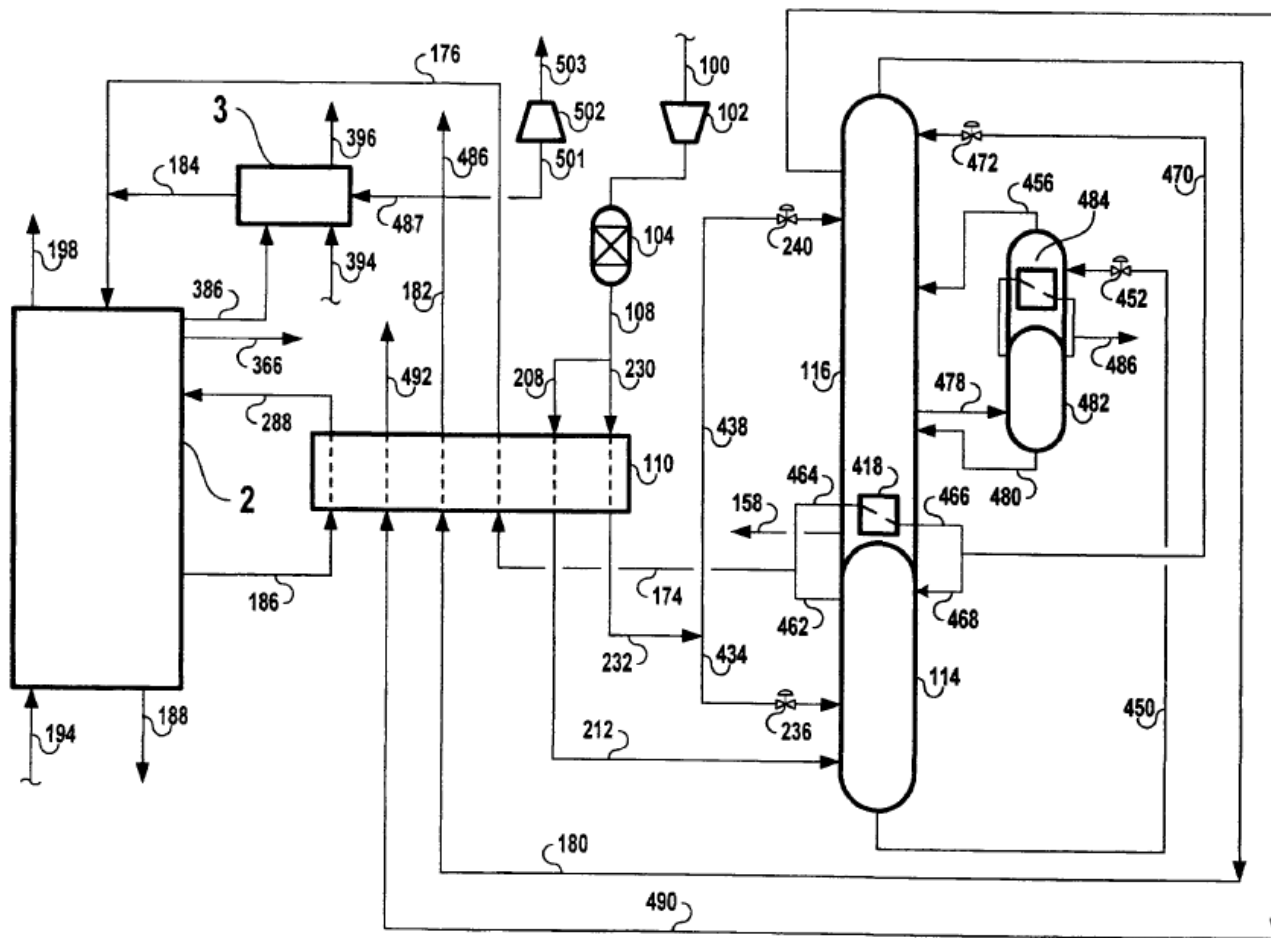
国外主要LNG冷能空分项目

LNG接收站	生产能力 (t/d)			
	总产量	液氮	液氧	液氩
日本跟岸	320.9	210	104.5	6.4
日本泉北	488.4	225	257	6.4
日本泉北	971.9	750	205.7	16.2
日本袖浦	389.5	180	205.7	3.8
日本知多	320.8	180	137	3.8
韩国平洋	674.4	450	205.7	18.7

国内主要LNG冷能空分项目

LNG接收站	生产能力 (t/d)			
	总产量	液氮	液氧	液氩
福建莆田	610	300	300	10
江苏如东	612	300	300	12
浙江宁波	614.5	300	300	14.5
河北唐山	723	150	547	26
广东珠海	614.5	300	300	14.5

1) AP冷能空分技术



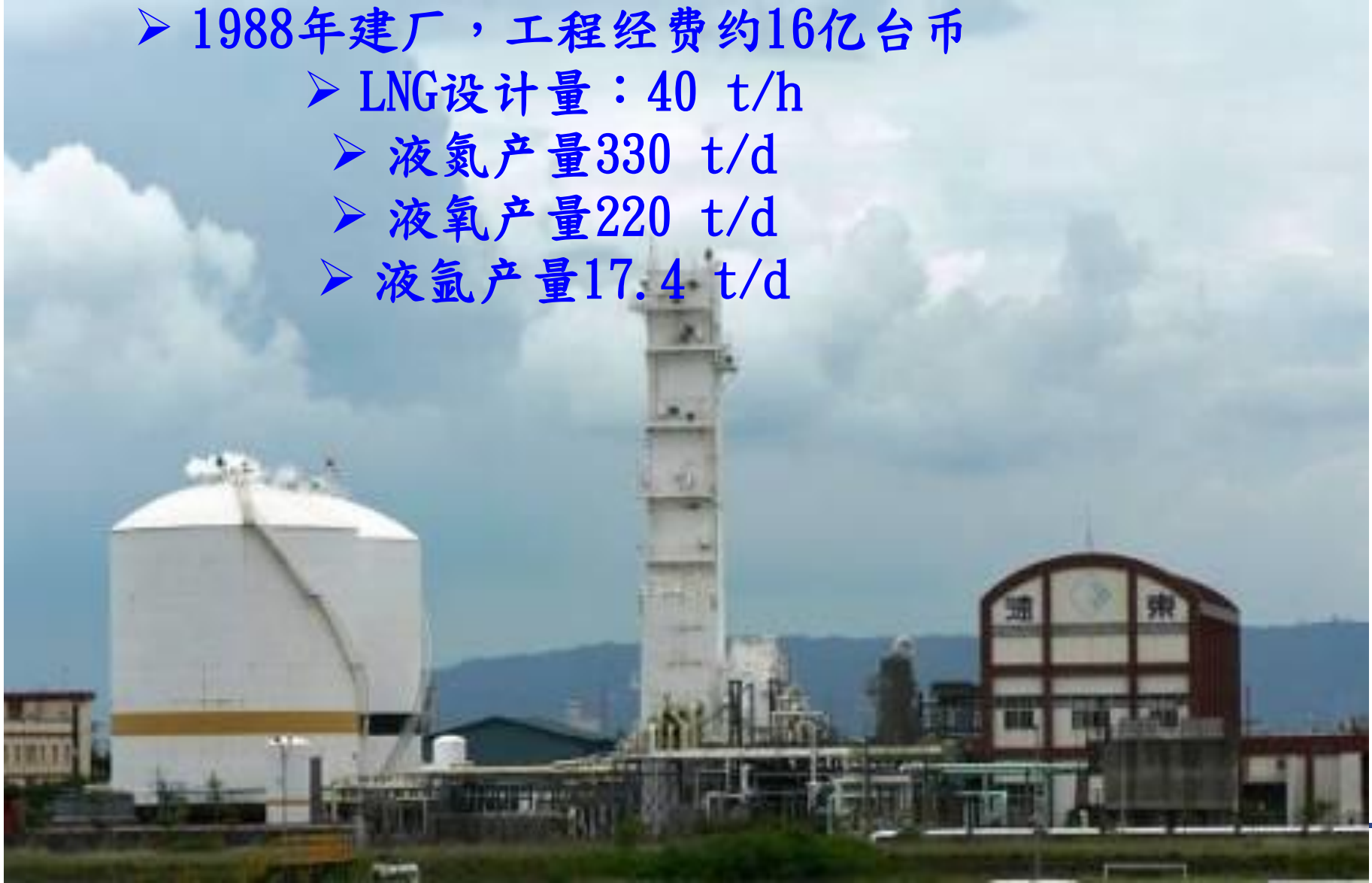
关键设备：2-基于LNG的液化器，3-附加处理单元，102-空压机，104-吸附装置，110-主换热器，114/116-空分塔，418-主冷凝蒸发器，
 482/484-提氦塔，502-氮压机

关键物流：100-空气，158-液氧，188-液氮，194/394-LNG，198/396-天然气，366/487/503-氮气，486-液氦，492-污氮

- 关键部件为基于LNG的液化器和附加处理单元
- 附加处理单元具有换热和增压功能，其存在使整套装置负荷调节能力大为增强，可以根据需要调节LNG的流量来获得不同的液氮产量；这样相对独立的设计也使基于液氧产量设计的装置主要部分不受液氮产量大幅变化的影响，可以保持相对稳定的运行状态
- 在中国代表性案例
 - 台湾永安
 - 福建莆田

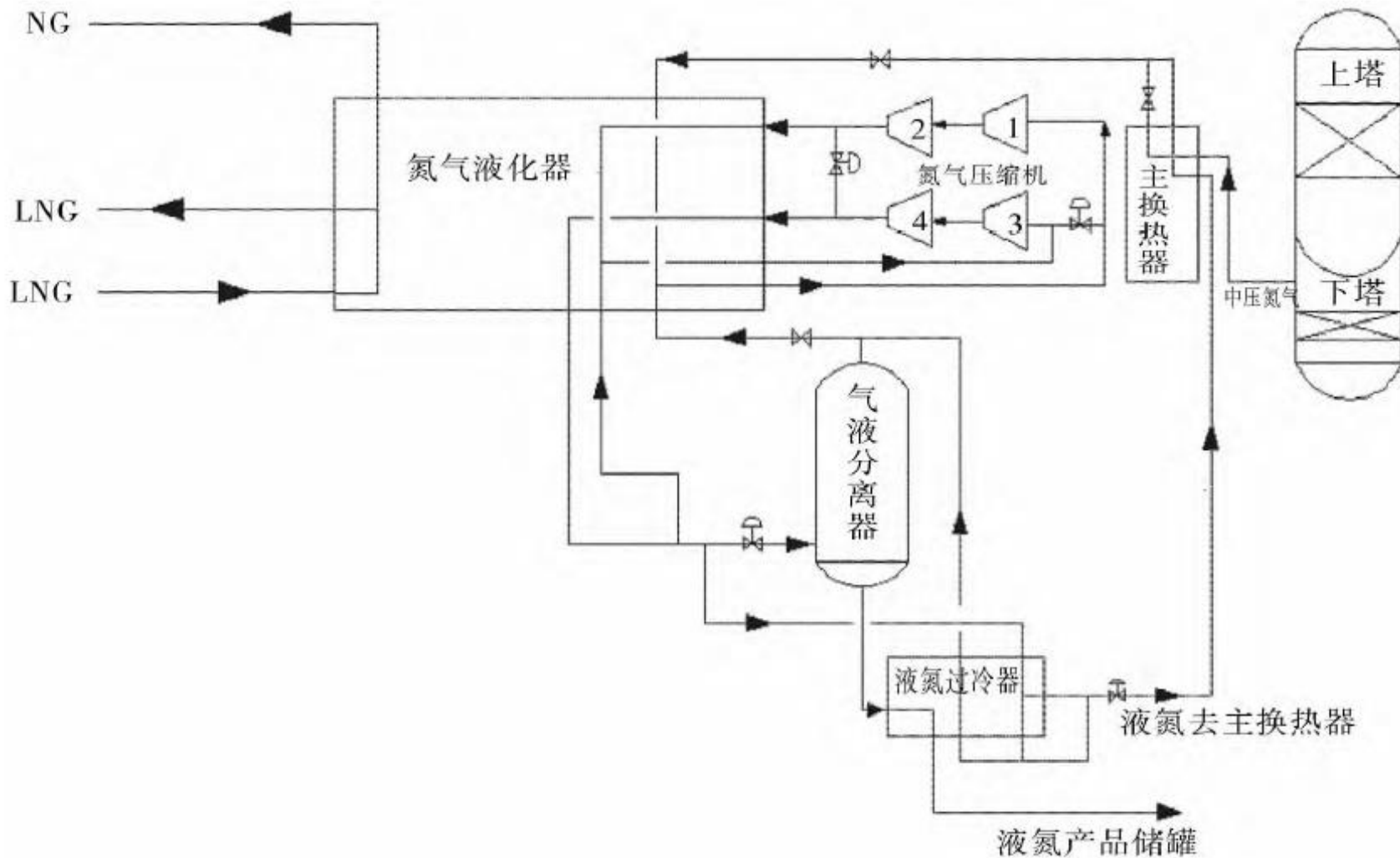


- 1988年建厂，工程经费约16亿台币
 - LNG设计量：40 t/h
 - 液氮产量330 t/d
 - 液氧产量220 t/d
 - 液氩产量17.4 t/d

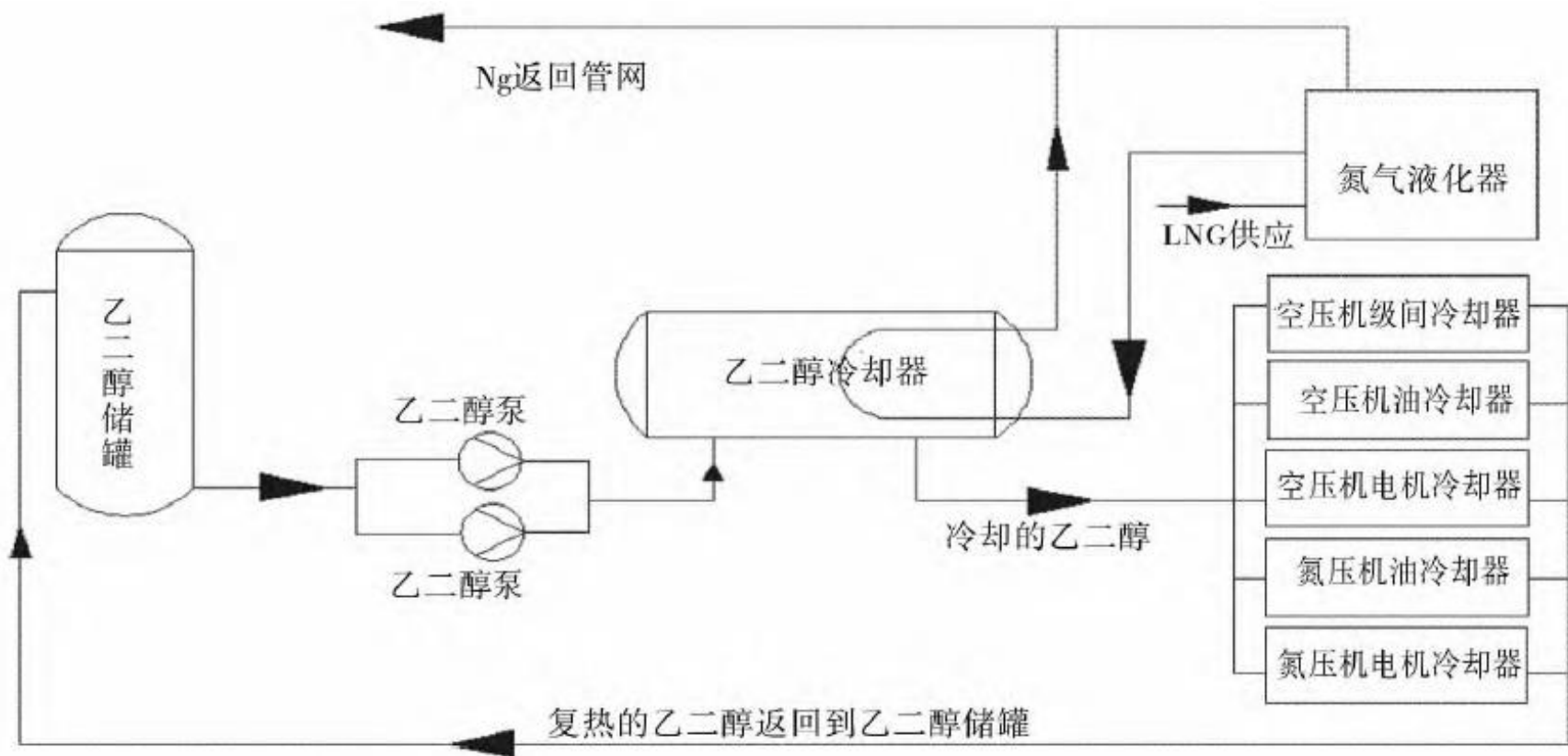


- 2010年11月12日，中国首个液化天然气冷能空气分离装置（ASU）正式投产。作为空气产品公司与中海油能源发展股份有限公司的合资工厂，该工厂座落于福建莆田，以空气为原料，以LNG冷为主要能源，总产能日产600余吨液氧、液氮和液氩，设计能力为生产液氧300t/d、液氮300t/d、液氩10t/d。可满足福建省尤其是厦门、莆田和福州三角洲地区高速发展的工业气体市场的需求。

福建莆田LNG冷能空分装置氮气液化系统流程

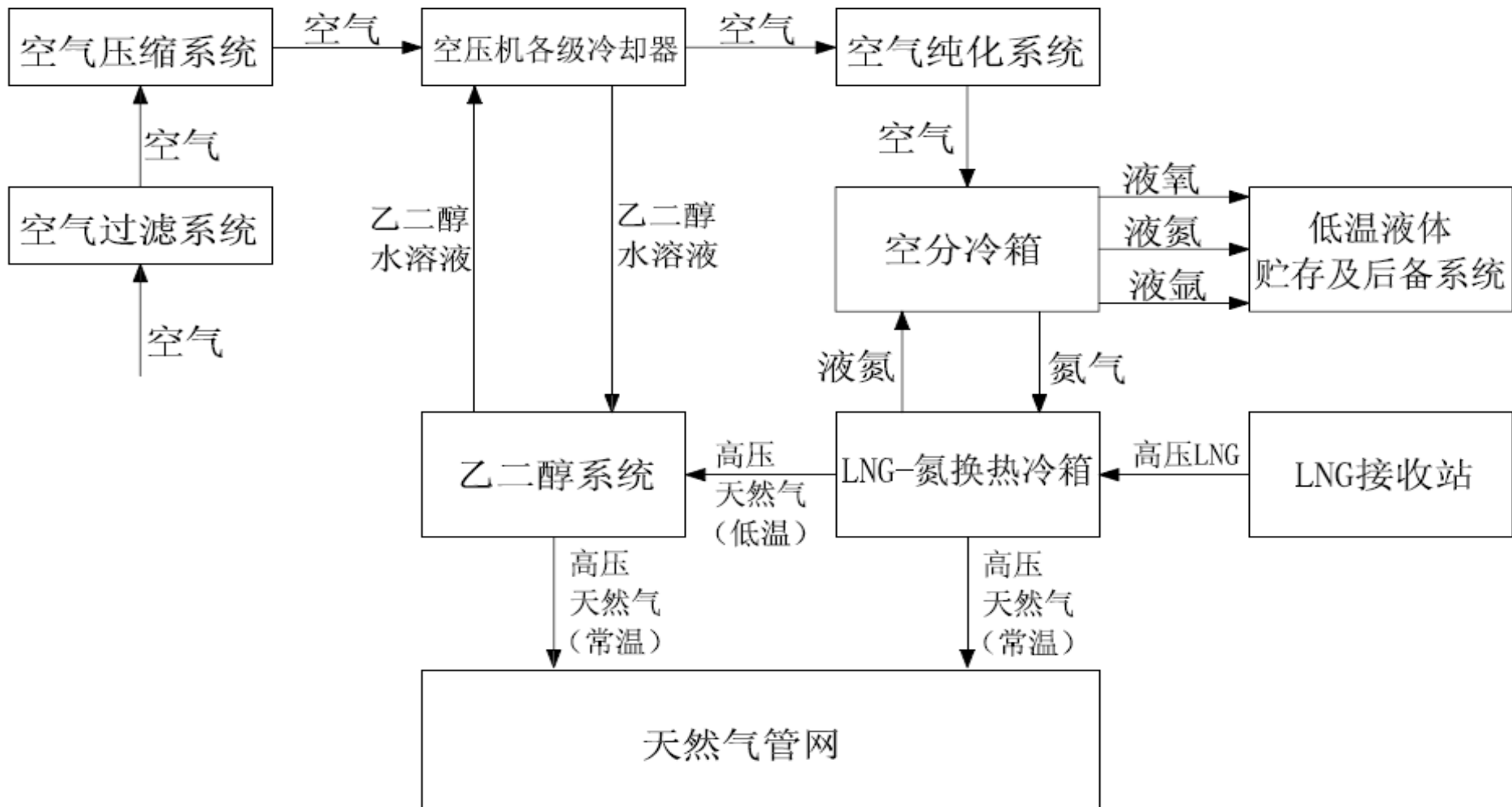


福建莆田LNG冷能空分装置乙二醇冷却水系统流程





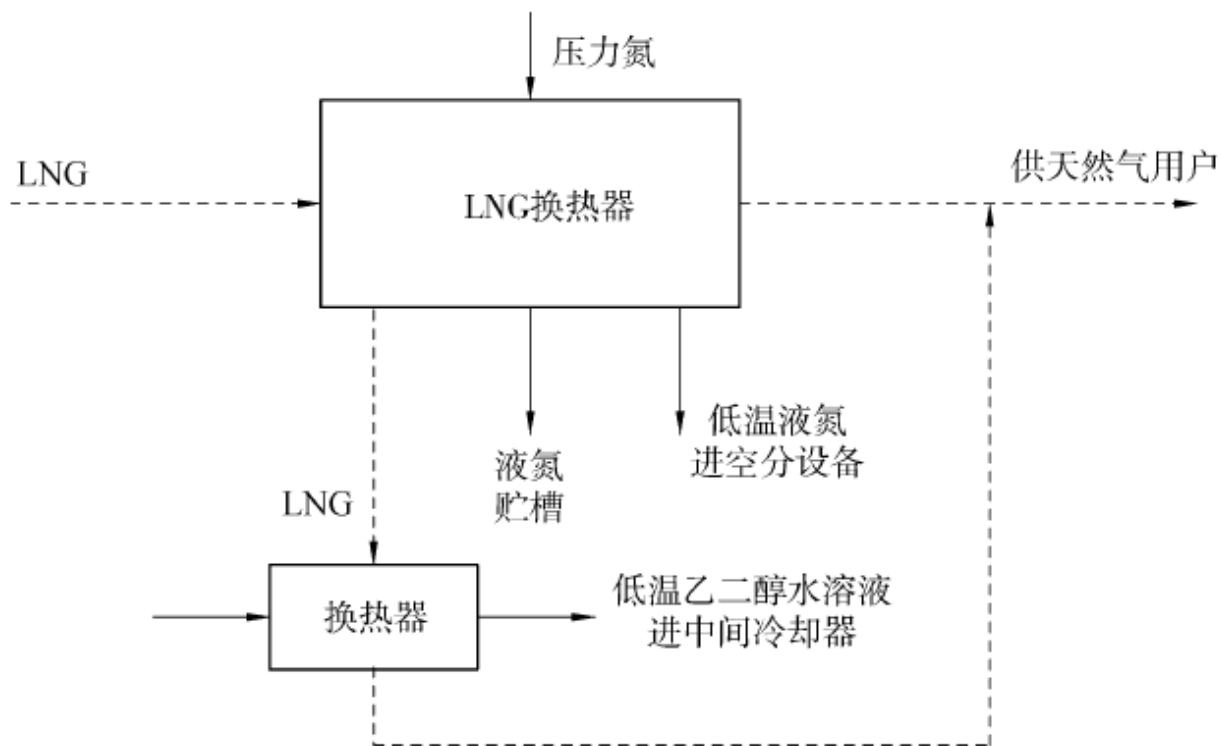
2) 川空-中海油冷能空分技术



- ④ LNG冷能空分装置采用氮气作为循环介质，吸收LNG低温段的冷量后被液化，返回空分冷箱，为空气的分离、液化提供冷量，取代了常规增压膨胀制冷的模式，节能降耗；同时采用乙二醇水溶液为循环冷却剂，吸收LNG高温段的冷量后去空压机级间冷却器，降低了空压机的级间温度，从而进一步降低了能耗；而闭式循环的乙二醇水溶液系统基本不消耗水，从而降低了装置的水消耗
- ④ 充分利用冷能后的空气分离装置整体运行电耗可降低约56%，工艺耗水可降低99%以上。同时LNG冷能空分装置在减排CO₂方面也有重要意义，一套600t/d的液体空分装置，相当于间接减排CO₂约8.5万t/a
- ④ 典型案例：中海油宁波、中海油珠海和中石油唐山

- ① 工艺流程由两大系统组成: LNG 冷能回收系统和空气液化、分离系统。
- ② 主要节能措施
 - 采用闭式乙二醇水溶液循环冷却系统。常规空分设备配套压缩机的级间冷却器采用32°C的冷却水, LNG冷能空分空压机各级冷却器采用5°C的乙二醇水溶液冷却, 大大降低了空压机各级空气的进口温度, 从而降低了压缩机的功耗
 - 采用低温氮压机取代常温氮压机
- ③ 代表性案例: 中石油如东

LNG冷能利用系统





主要问题

- LNG供应不连续
- LNG供应温度高



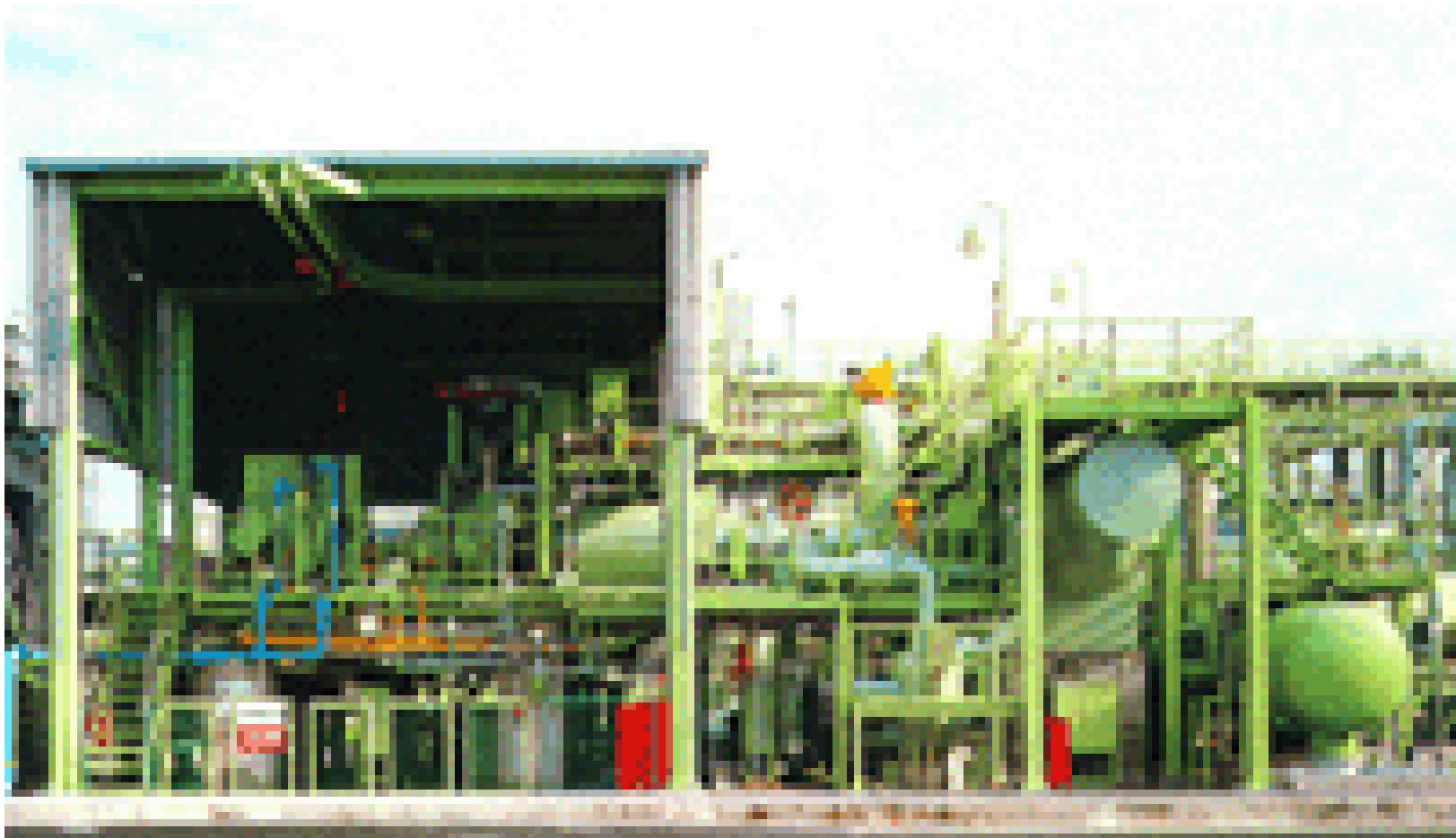
展望

- 液体空分装置产品结构优化
 - 气体空分技术
 - 与低温液体储能的结合
-

2.2 低温发电

1) 日本LNG冷能发电项目概览

公司及终端名	套数	输出功率 /kW	类型	LNG消耗量/(t/h)	输出压力/MPa
1. 大阪煤气, Senboku Daini	1	1450	朗肯	60	3.0
Senboku Daini	1	6000	朗肯/ 直接膨胀	150	1.7
Himeji	1	2800	朗肯	120	4.0
Senboku Daini	1	2400	直接膨胀	83	0.7
Himeji	1	1500	直接膨胀	80	1.5
2. Toho Gas, Chita Kyodo	1	1000	朗肯	40	1.4
3. Kyushu电力、日钢, Kitakyushu LNG	1	8400	朗肯/ 直接膨胀	150	0.9
4. Chubu电力, Chita LNG	2	各7200	朗肯/ 直接膨胀	各150	0.9
Yokkaichi	1	7000	朗肯/ 直接膨胀	150	0.9
5. Tohoku电力, Nihonkai LNG	1	5600	直接膨胀	175	0.9
6. 东京煤气, Negishi	1	4000	混合工质 朗肯	100	2.4
7. 东京电力, Higashi Ogishima	1	3300	直接膨胀	100	0.8
Higashi Ogishima	2	各8800	直接膨胀	各170	0.4

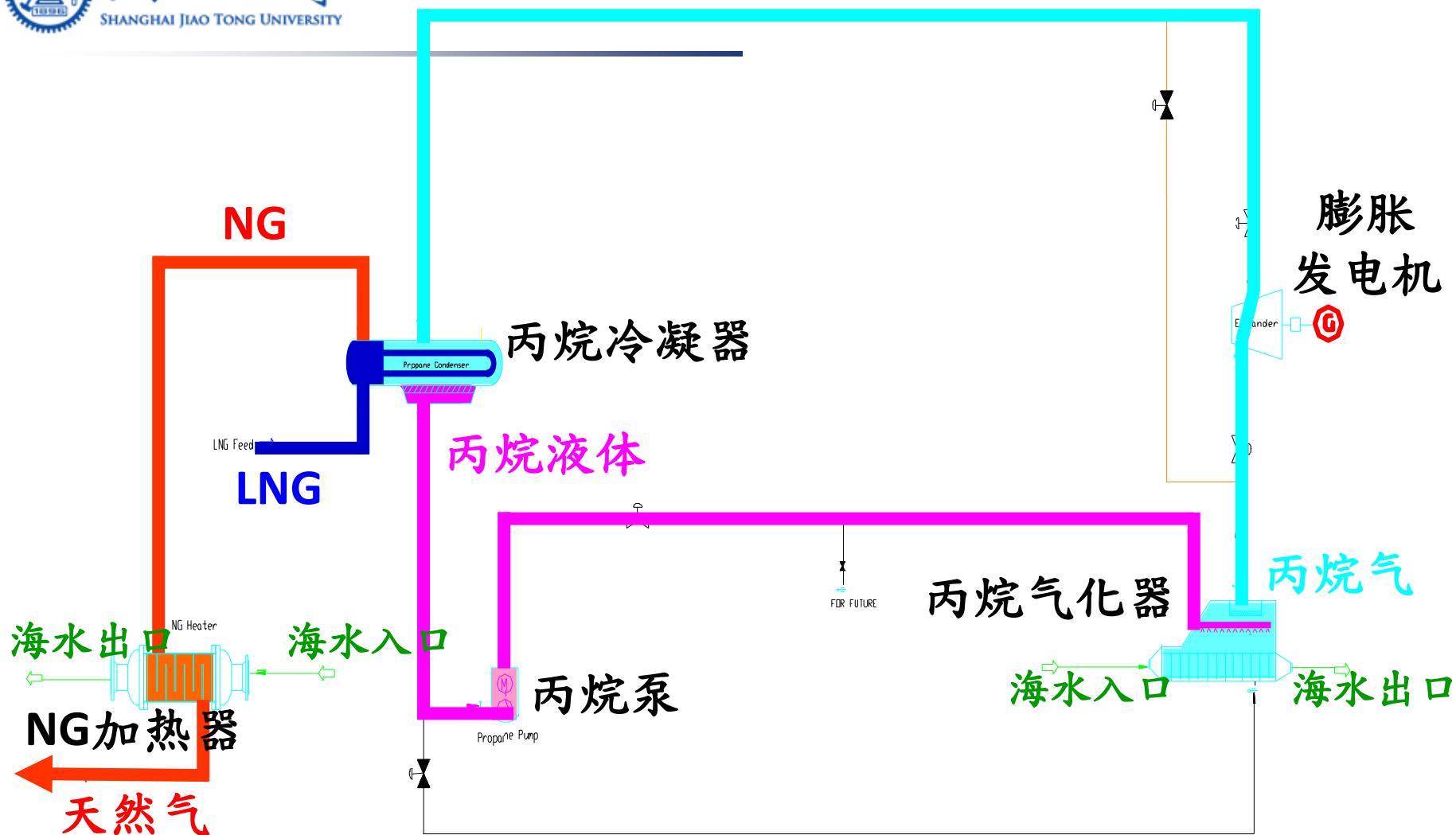




LNG : 100 t/h

发电量 : 2,000 kW





压能发电厂



NG : 120 t/h

发电量 : 3,000 kW

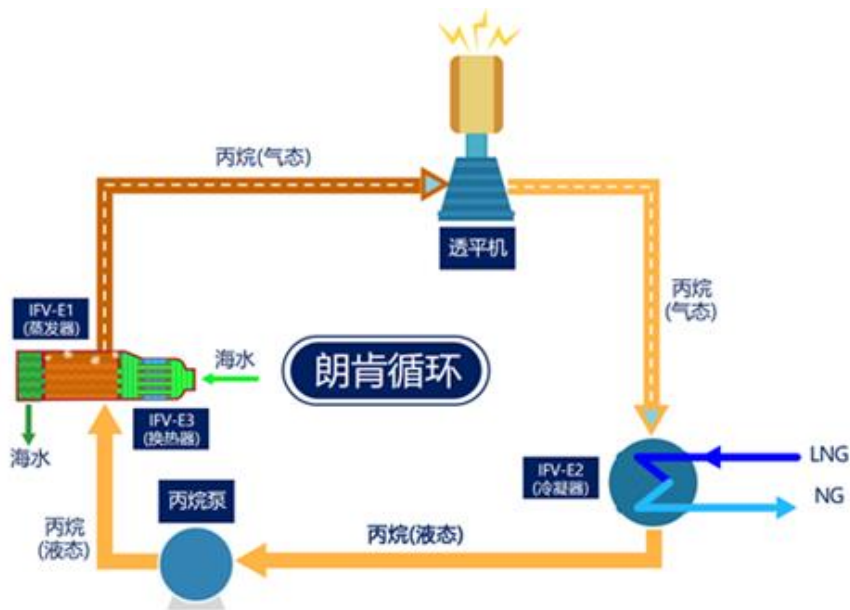
3) 上海LNG冷能发电项目

- ① **上海液化天然气有限责任公司**由申能集团、中海石油气电集团按照55%：45%的投资比例组建，成立于2005年1月，负责投资、建设和运营LNG接收站和输气管道项目。
- ② 目前，公司在LNG资源接卸、气化外输基础上，开展了保税反输加注、新船气试等业务，**实施投运冷能发电装置项目并积极开展LNG冷能利用系统研究。**



- 地点：上海国际航运中心洋山深水港区
- 工艺装置规模：气化能力205t/h，发电装机容量4680kW
- 项目进展
 - 机械完工：2022年11月
 - 竣工验收：2022年11月
 - 并网发电成功并通过168h可靠性试验：2023年4月
 - 安全设施竣工验收：2023年9月

- 冷能发电装置的主要设备有**中间介质气化器IFV**，**丙烷循环泵**和**透平发电机组**。该循环中含有三种工艺介质：**LNG**、**海水**及**制冷剂级丙烷**。其中丙烷为闭路循环，以低温LNG作为冷源，其额定LNG气化量为205.2 t/h；以海水作为热源，其设计流量为8500 t/h。





裝置全圖





- ④ LNG冷能低温发电
 - 新型循环
 - 混合工质
 - 考虑全年运行的设计优化
- ④ 常规天然气电厂的LNG冷能利用
 - 燃气轮机进气冷却
 - 电厂碳捕集



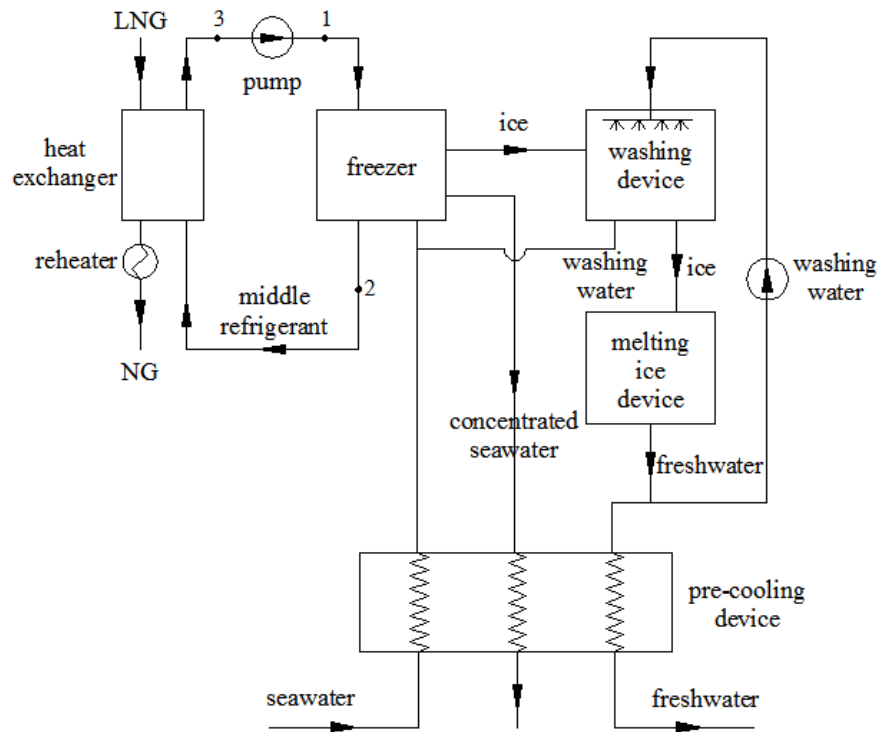
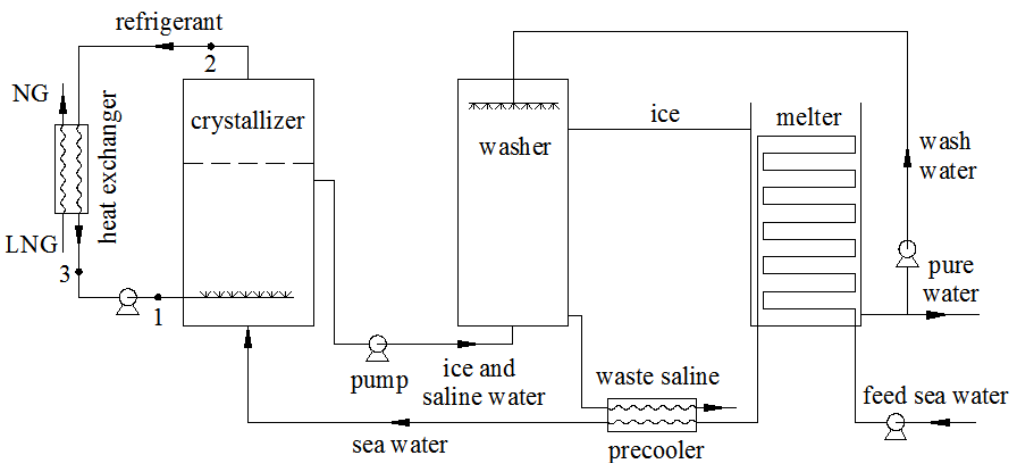
3.1 海水淡化

3.2 储能

3.3 碳捕集

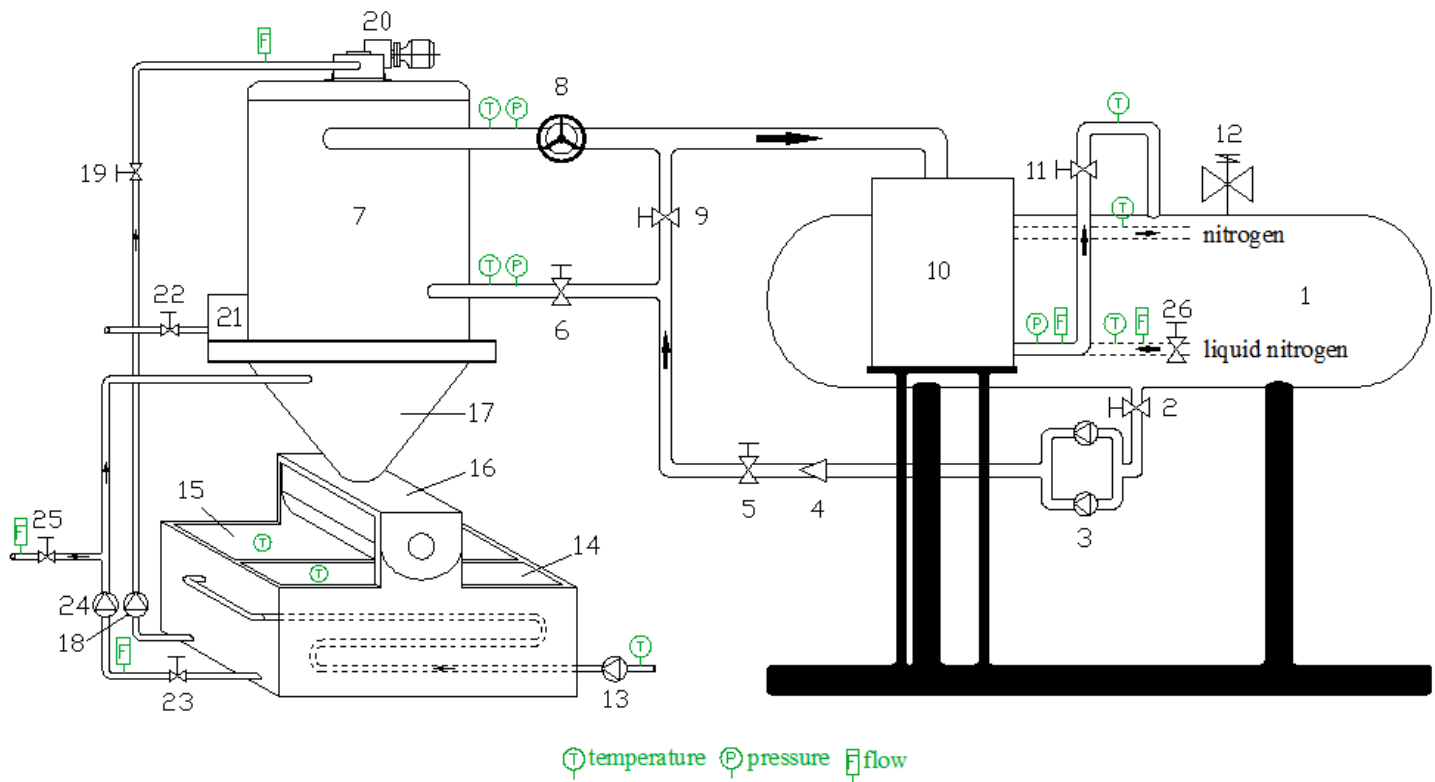
3.1 海水淡化

- 海水部分结冰时，可以有约80%盐分被排除在冰晶之外
- 直接法与间接法



1) 海水结冰法海水淡化

上海市重点科技攻关专项“利用液化天然气冷能的海水淡化技术与装置的研究开发”



1—循环桶；2, 5, 6, 8, 9, 11, 19, 22, 23, 25, 26—流量阀；3—电磁屏蔽泵；
 4—单向截止阀；7—片冰机；10—低温换热器；12—安全阀；13, 18, 24—水泵；
 14—融冰槽；15—混合槽；16—分离器；17—洗涤器；20—布水盘；21—浓海水收集槽

利用LNG冷能的海水淡化流程图





◆ 水合物法海水淡化难点

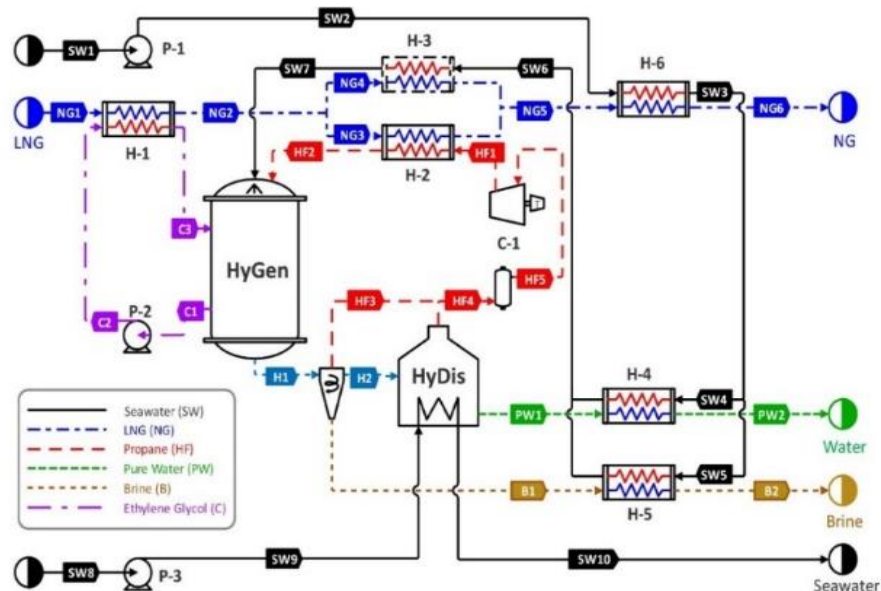
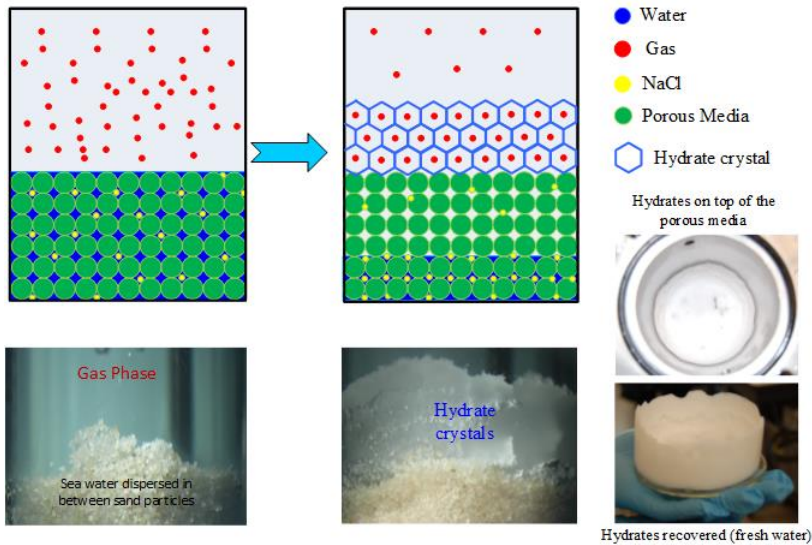
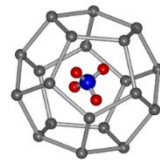
- ◆ 反应动力学慢
- ◆ 能耗过高
- ◆ 需低温环境

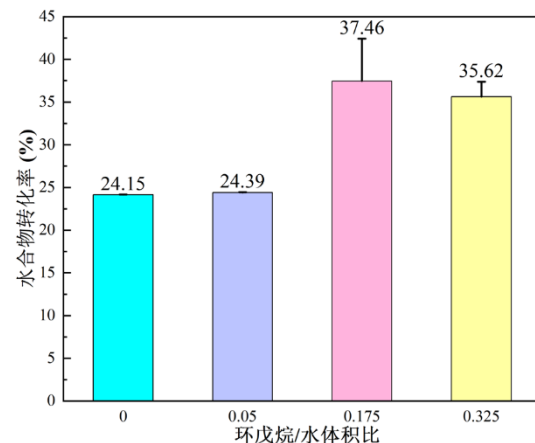
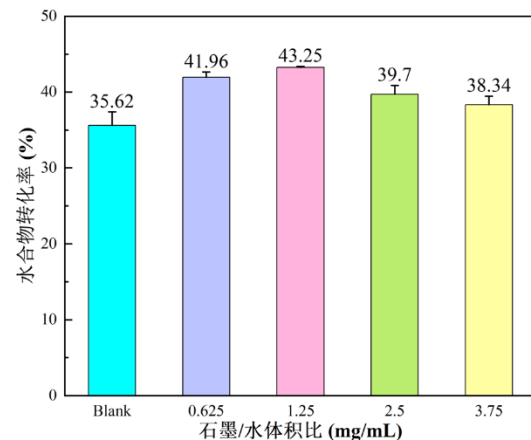
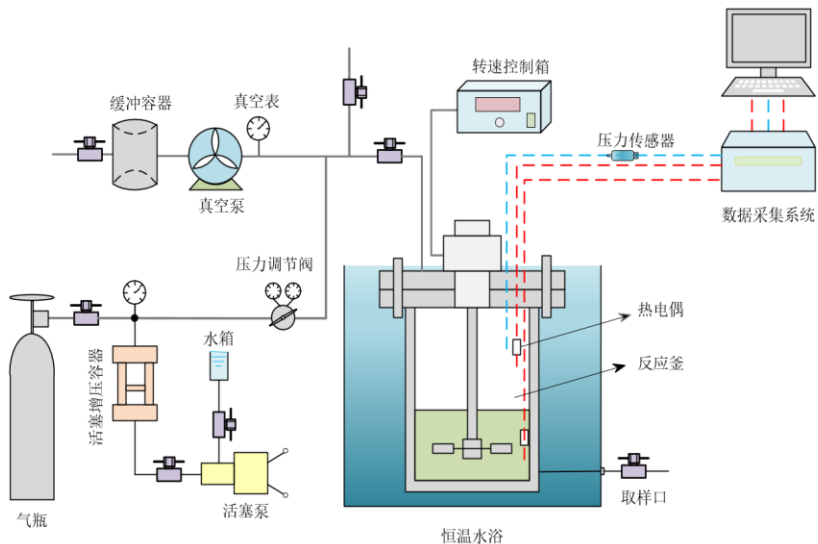
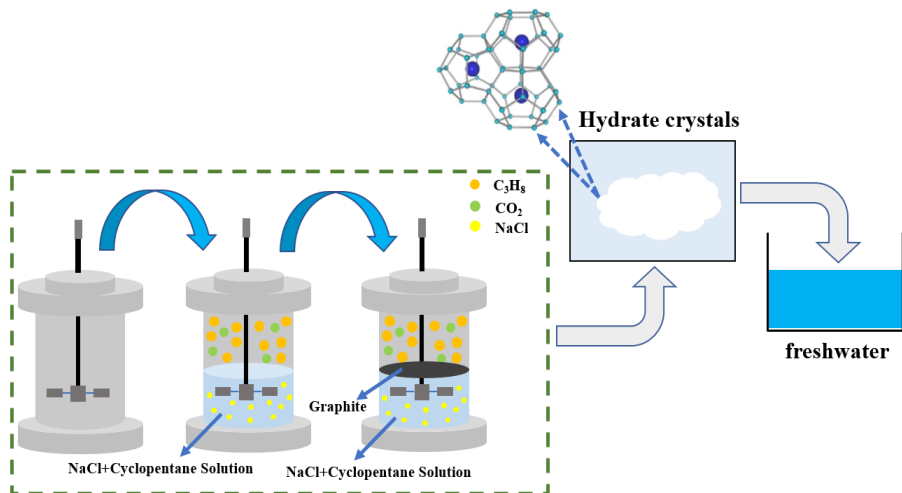
◆ 机理研究

- 降低成核自由能
- 能量-水耦合

◆ 技术对策

- ✓ 多孔介质
- ✓ LNG冷能利用





环戊烷和石墨颗粒可以加快水合物生成速率

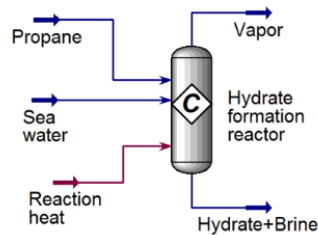
- 环戊烷/水体积比为 0.175 时水合物转化率为 37.46%
- 石墨/水体积比为 1.25mg/mL 时水合物转化率为 43.25%



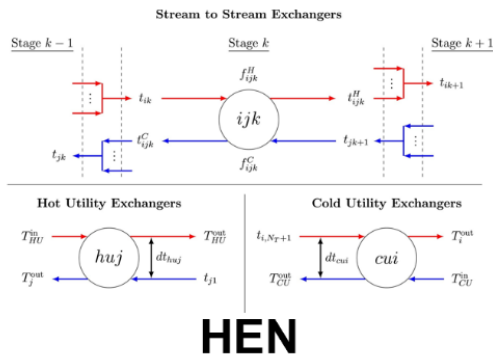
HYSYS



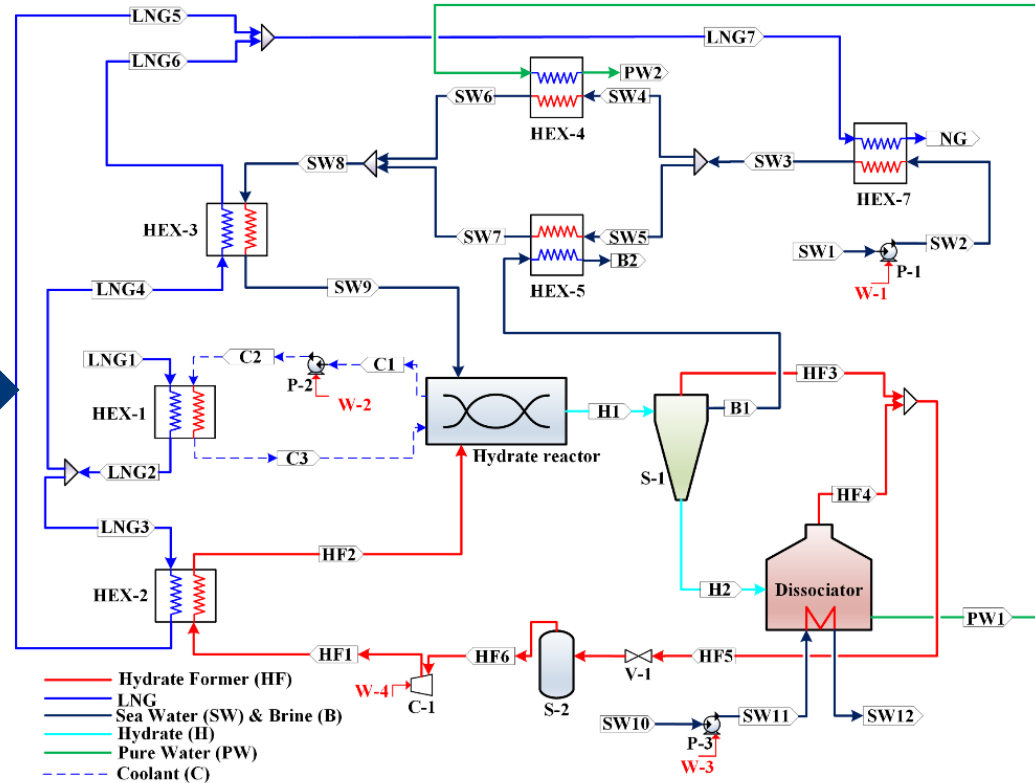
GAMS



Process



HEN



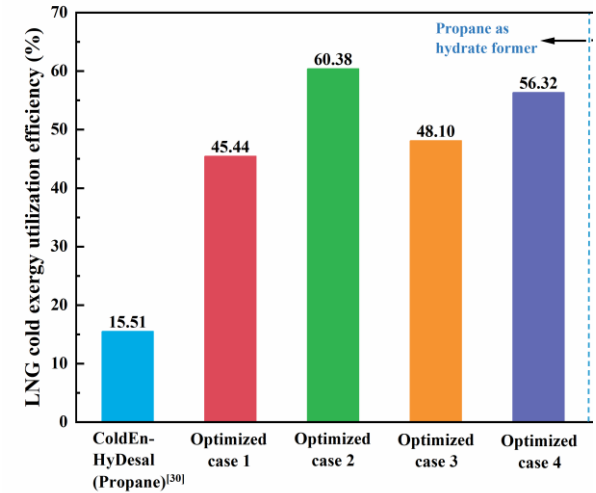
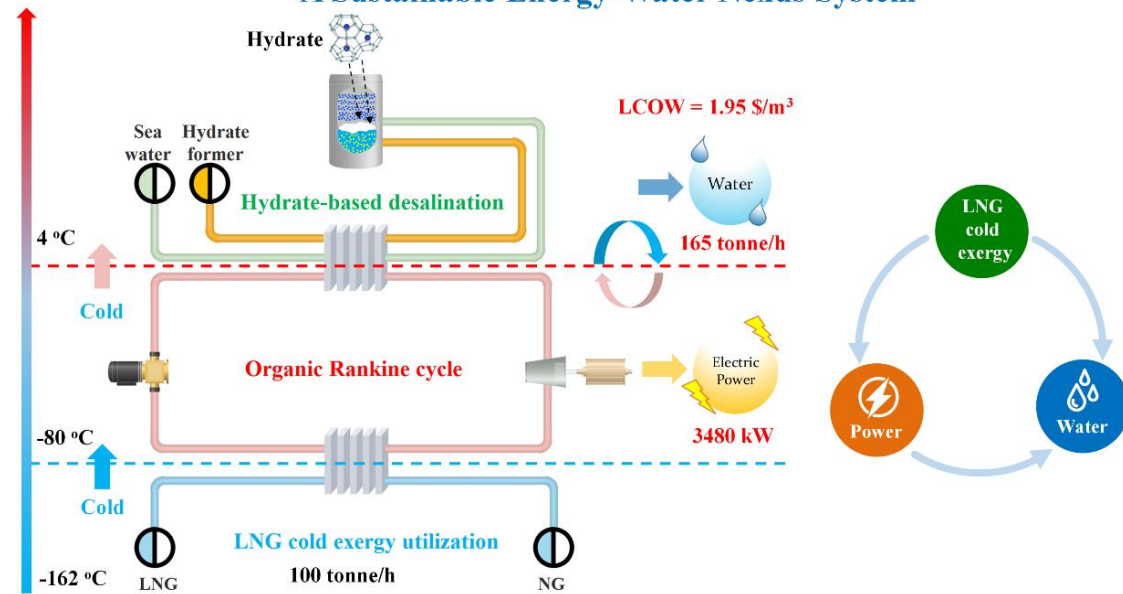
LNG冷能发电集成海水淡化，系统能量优化

● 系统能耗大幅降低0.35 kWh/m³

● 1 t/h LNG 气化能力生产 1.3 m³/h 淡水

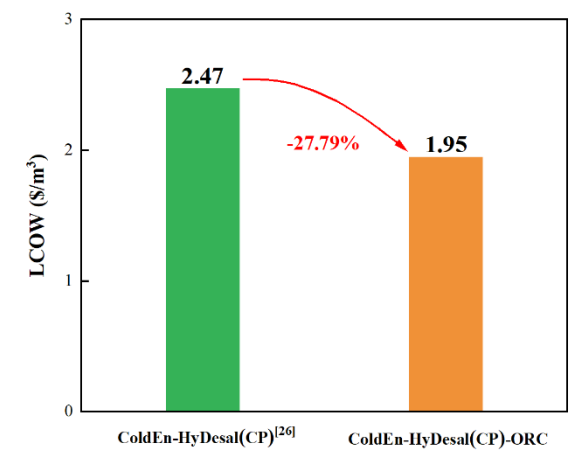


A Sustainable Energy-Water Nexus System



新型能源-水耦合系统模型：多目标集成+ 系统参数变化

- 淡水产量165 t/h
- 额外输出电能3480 kW
- 淡水生产成本1.95\$/m³，降低27.79%
- LNG冷能利用率由15.51%提高至60.38%



相变储能

- 液体空气系统
- 液体二氧化碳系统
- 气固相变材料系统

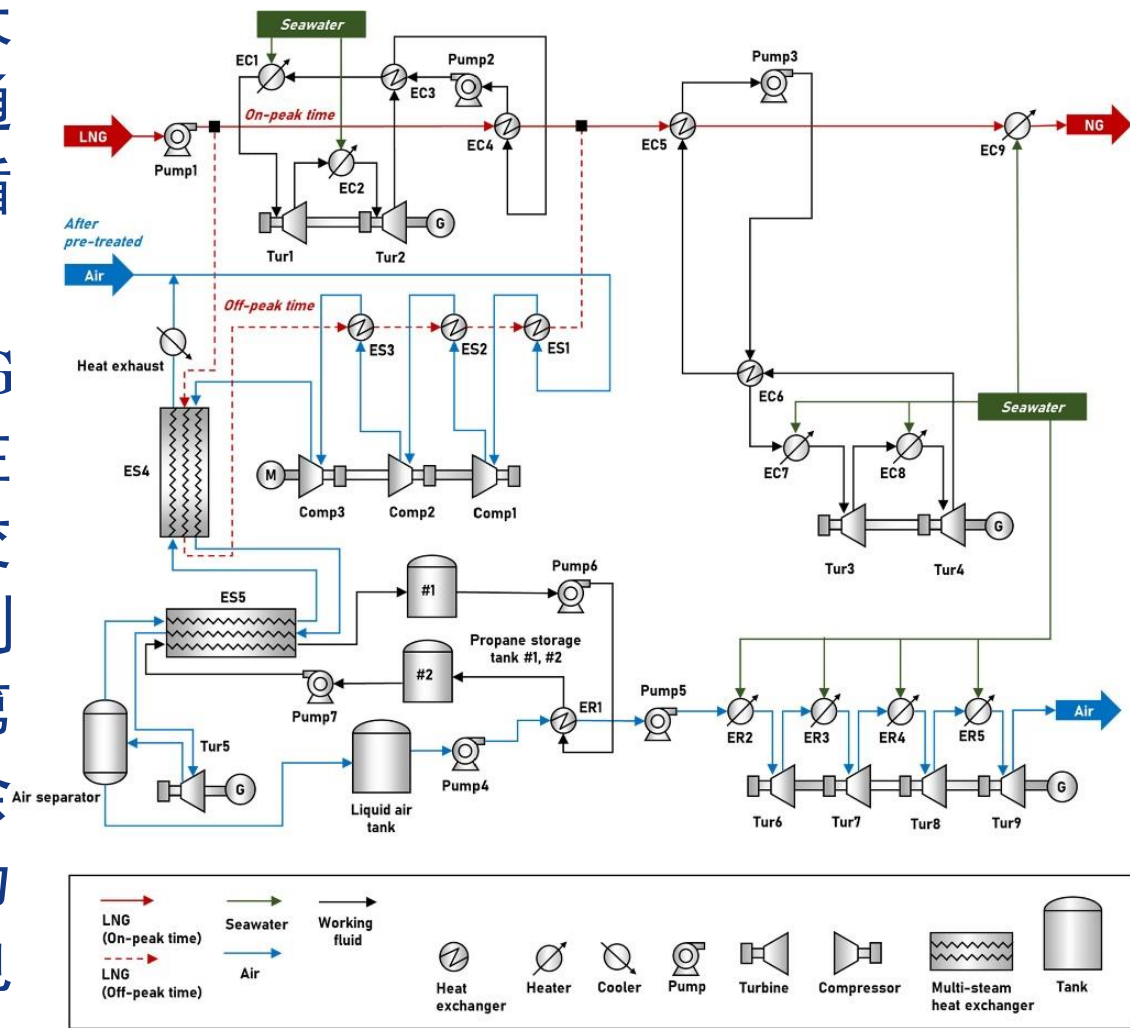
储热

- 抽水式热能存储 (PTES)



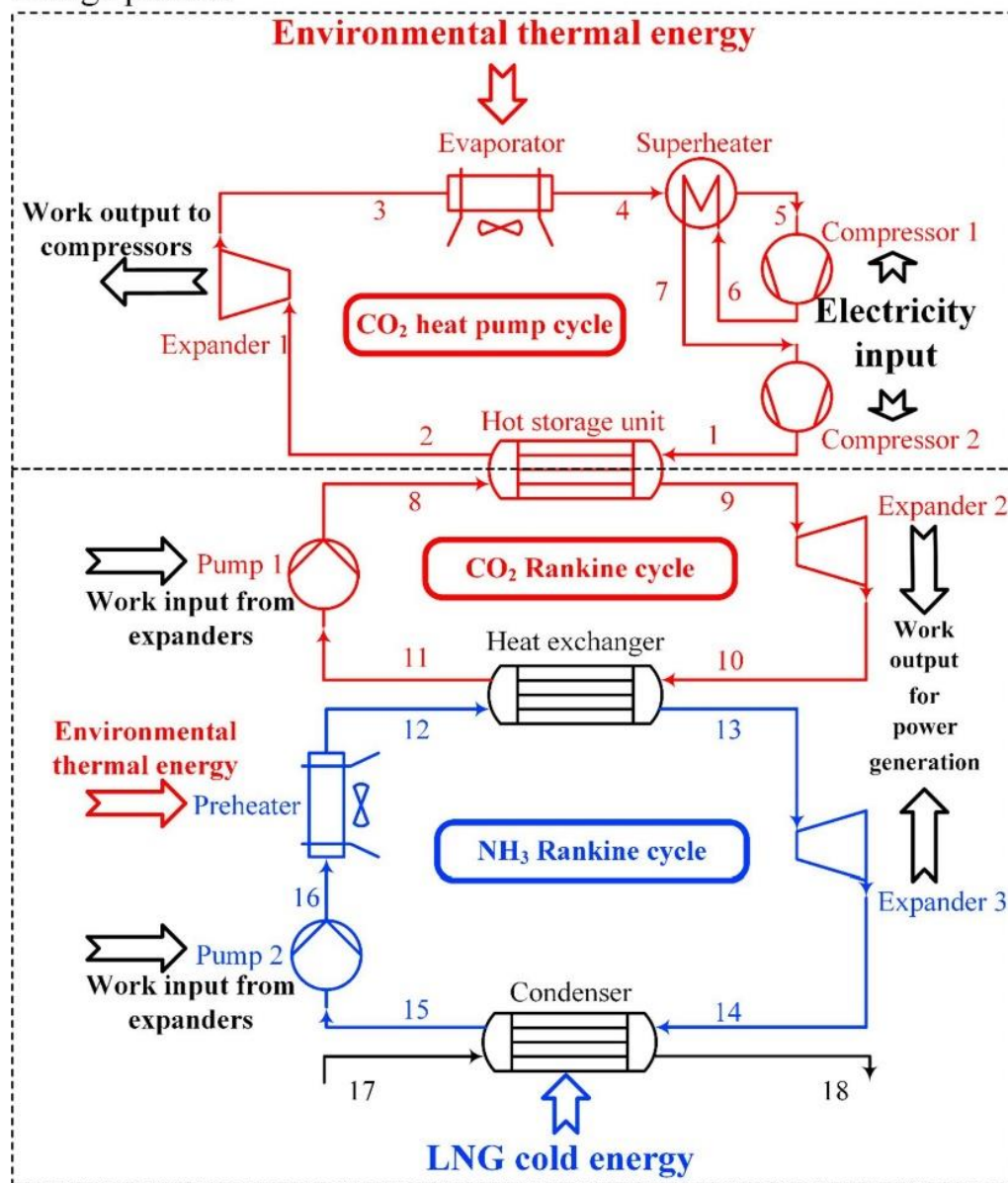
利用LNG冷能的液化空气储能系统

- 在高峰时间，液化天然气流入顶部流，通过两个串联的朗肯循环发电。
- 在非高峰时间，LNG可以流入底部流，在其中通过一系列热交换将LNG冷能传递到空气中，然后通过第二个朗肯循环将剩余的冷能回收以产生为空气多级压缩机供电的电力。



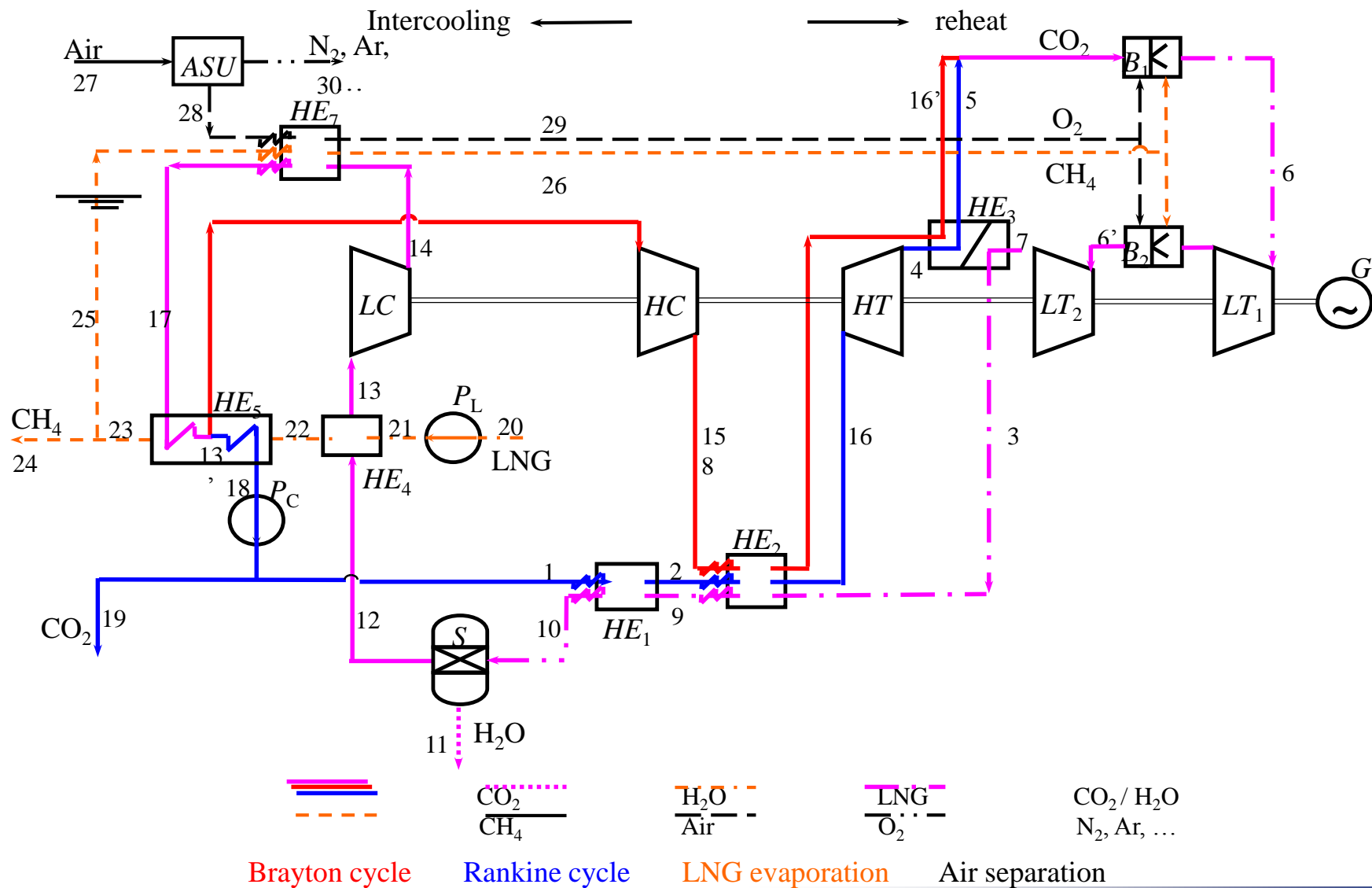
抽水式热能存储 (PTES)

Charge process



Discharge process

- ① 常规电厂烟气碳捕集
 - CO_2 浓度低
 - CO_2 分压低
 - CO_2 三相点压力高于500kPa，很难通过烟气加压使 CO_2 分压达到这个压力，因此，采用低温法捕集烟气中 CO_2 一般只能得到干冰
- ② 采用纯氧燃烧得到的烟气更有利于碳捕集



CO₂ cycle flow sheet with reheat and intercooling

- ① 影响主流程的担心
- ② 主流程气化能力的大幅波动
- ③ 经济性的制约
- ④ 梯级利用？ - 看上去不错.



泰国PTT LNG接收站办公楼与花园一体化设计，
利用LNG冷能提供适合郁金香生长的低温环境



谢 谢!

林文胜
上海交通大学制冷与低温工程研究所
Tel: 13621908234
Email: linwsh@sjtu.edu.cn

