



天津大学

TianJin University

Founded 1895



# 绿色高效技术

## 在中国冬奥会中应用

Application of green and efficient  
technology in China Winter Olympic

天津大学热能研究所

马一太 [ytma@tju.edu.cn](mailto:ytma@tju.edu.cn)

# 2015年中国北京、张家口 申请冬奥成功



天津大学

BEIJING 2022™



# 蒙特利尔议定书基加利修正案 天津大学

## The Kigali Amendment of Montreal Protocol



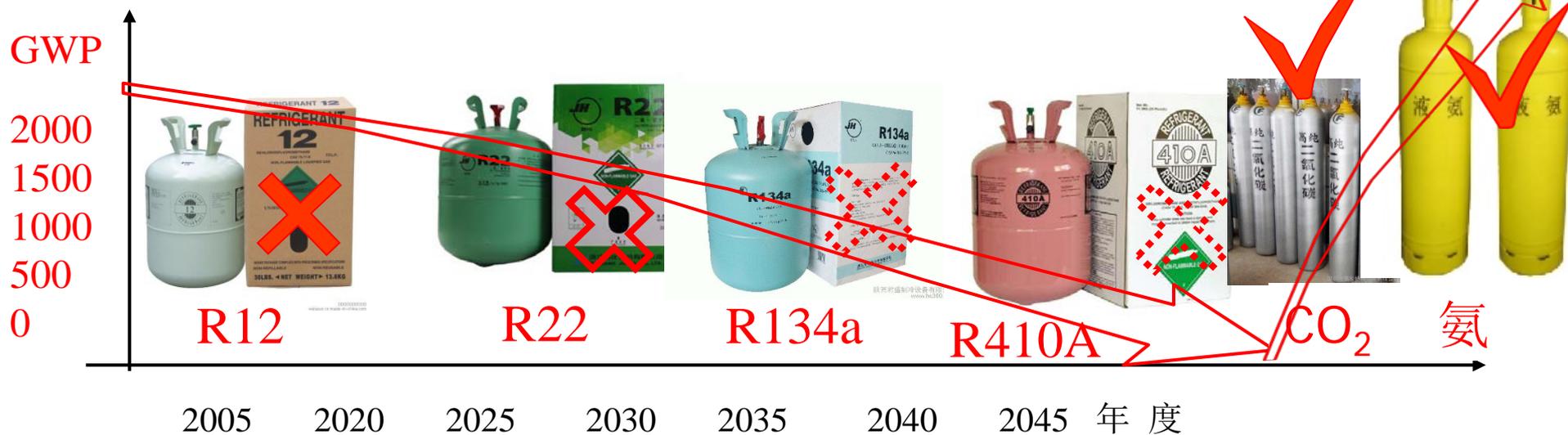
- 2016年10月10日至14日，《关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书》第28次缔约方会议在卢旺达首都基加利市召开，来自近200个国家的800多名代表最终通过了将氢氟碳化合物（HFCs）纳入蒙特利尔议定书框架内进行管控的基加利修正案。
- 发达国家将在2019年前开始逐步减少HFCs；发展中国家将在2024年起冻结HFCs的消费量，其中一些发展中国家则需在2028年冻结消费。至2040年代后期，预计所有缔约方国家的消费量不超过各自基准量的15-20%。

# 未来制冷和热泵工质的发展方向

- 随着CFC、HCFC、HFC陆续淘汰，今后制冷与热泵将是自然工质的天下。
- 国外提出的HFO烯烃类制冷剂，是价格高、分解产物含有氟甚至氯，前景有很大的不确定性。
- **R507的GWP3800，被国际奥委会否定。**
- **谁掌握了氨、CO<sub>2</sub>循环技术，谁就掌握了未来。**

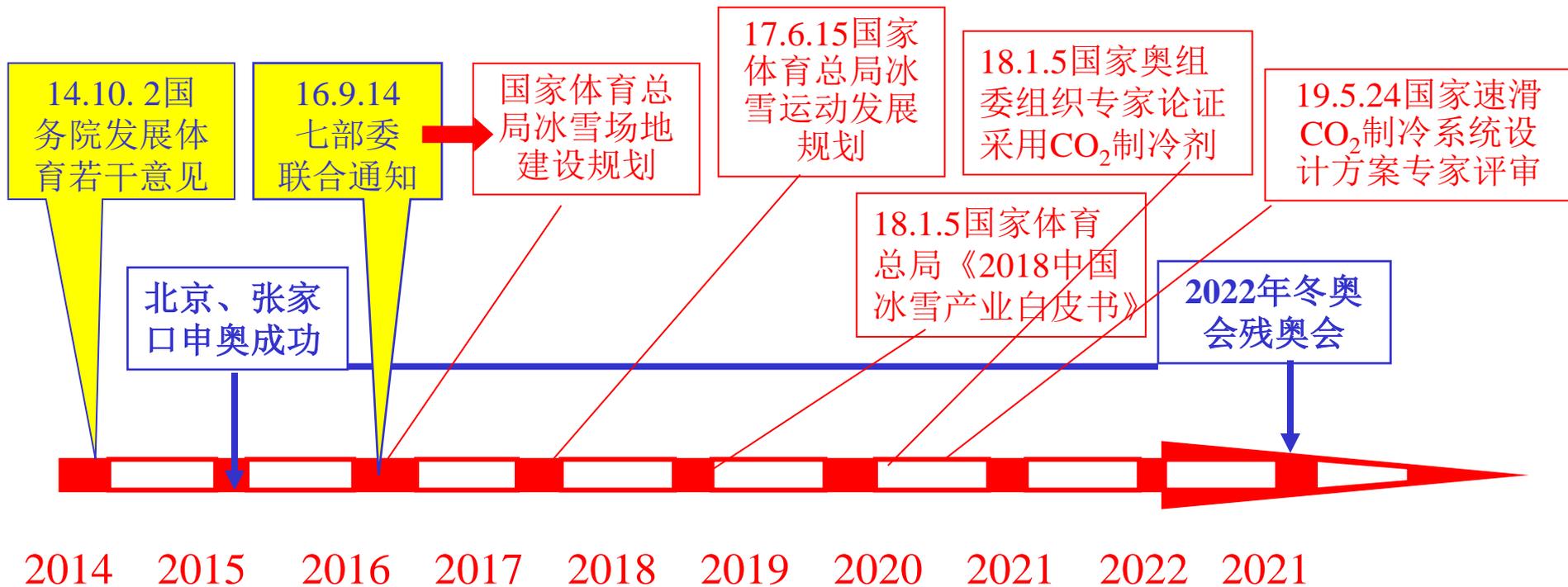


R1234yf



# 这又是个一脉相承的计划

- 2014年10月2日国务院《关于加快发展体育产业促进体育消费的若干意见》
- 2016年9月14日七部委转发国家体育总局《全国冰雪场地设施建设规划》（2016-2022年）通知。
- 2017年6月15日国家体育总局《冰雪运动发展规划（2016-2025年）》。
- 2018年9月5日国家体育总局《“带动三亿人参与冰雪运动”实施纲要(2018-2022年)》。
- 2019年3月4日2022年冬奥会组委会召集专家论证会，国家速滑馆采用CO<sub>2</sub>制冷剂。
- 2019年5月24日，专家组通过国家速滑馆CO<sub>2</sub>跨临界系统设计方案评审。
- 2021年初，包括国家速滑馆、各预赛场馆和运动员训练基地全部完成。



# 冬奥文件政策总结



- **21世纪议程：**《奥林匹克运动21世纪议程》确立了奥林匹克运动在其能为可持续发展做出有效贡献。
- **产业：**政府引导、社会参与，建设冰雪休闲健身、竞赛表演和旅游为目标的冰雪装备制造产业体系。
- **教育：**北方地区中小学应将冰雪运动项目列入冬季体育课教学内容。
- **标准：**制定《冰雪运动大众等级标准及实施办法》、《大众冰雪赛事标准与服务指南》等规范。
- **统计：**实施“带动三亿人参与冰雪运动”统计制度，每年发布《中国冰雪运动白皮书》。
- **经费：**设立“冰雪运动发展基金”，引导社会力量参与群众性冰雪运动发展，吸引社会资本。
- **科研：**鼓励有成立奥林匹克教育学院，组织大专院校、科研部门的专家学者开展冬季奥林匹克教育研究工作。

# 冬奥文件数据总结

- **人数：**直接参加冰雪运动的人数超过5000万，并“带动3亿人参与冰雪运动”。
- **设施：**到2022年新建滑冰场不少于500座；新建滑雪场240座。  
常住人口超过50万的城市建设公共滑冰馆，有条件的城市应至少建设1片61m×30m冰面的滑冰馆。
- **教学：**2018年编制完成冰雪运动校园教学指南。全国中小学冰雪运动特色学校2020年达到2000所，2025年达到5000所。  
计划在全国中小学范围命名700余所“北京2022年冬奥会和冬残奥会奥林匹克教育示范学校”。其中北京地区建设200所，河北地区建设200所，其他省（市、区）分别命名10所。
- **师资：**到2020年完成5000名校园冰雪项目专职或兼职教师的培训。
- **产值：**到2020年我国冰雪产业总规模达到6000亿元，到2025年我国冰雪产业总规模达到10000亿元。

# 北京2022年冬奥会速滑馆将采用CO<sub>2</sub>制冰

- 2019年3月4日北京2022年冬奥会组委会召集专家论证会，结论是在北京国家速滑馆采用自然工质 CO<sub>2</sub>作为制冷剂。
- 这将在国际冬奥会历史上的首创，意义重大。



# 国家速滑馆通过专家论证



- 2019年5月24日，专家组通过国家速滑馆CO<sub>2</sub>跨临界系统设计  
方案评审。



# 中国郑重承诺



- 2019年7月23日国际奥委会第134次全会中，北京冬奥组委向全会展示了二氧化碳制冷剂宣传片。北京市副市长、北京冬奥组委执行副主席张建东表示，北京冬奥会全面践行《奥林匹克2020议程》和“新规范”，将努力打造一届节俭、智慧、绿色的赛事。



# CO<sub>2</sub>跨临界热泵循环

- CO<sub>2</sub>因为临界温度31.1℃较低，压缩后的高压工质，在较高环境温度下不能冷凝，而在超临界条件下放热。这样适合用于热泵循环，得到较高的出水温度。
- 这个循环通常称为“跨临界热泵循环”。
- CO<sub>2</sub>跨临界热泵循环供水温度高，可以高达65℃以上，但是也需要较低的进水温度，最好在15℃-25℃左右。
- CO<sub>2</sub>跨临界热泵循环特别适合用于生活热水或工业用热水，如果用于采暖系统，需要设计成大供回水温差的系统。

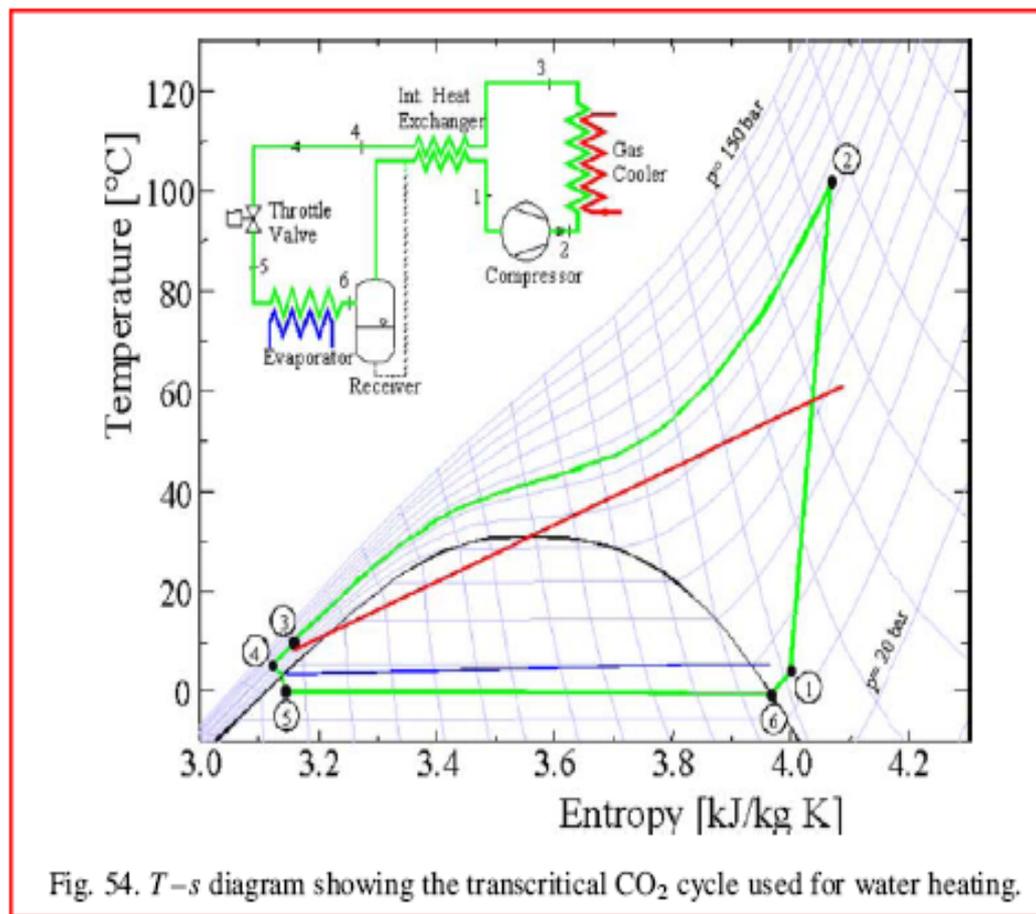


Fig. 54.  $T-s$  diagram showing the transcritical CO<sub>2</sub> cycle used for water heating.

# 建设国家速滑馆（银丝带）



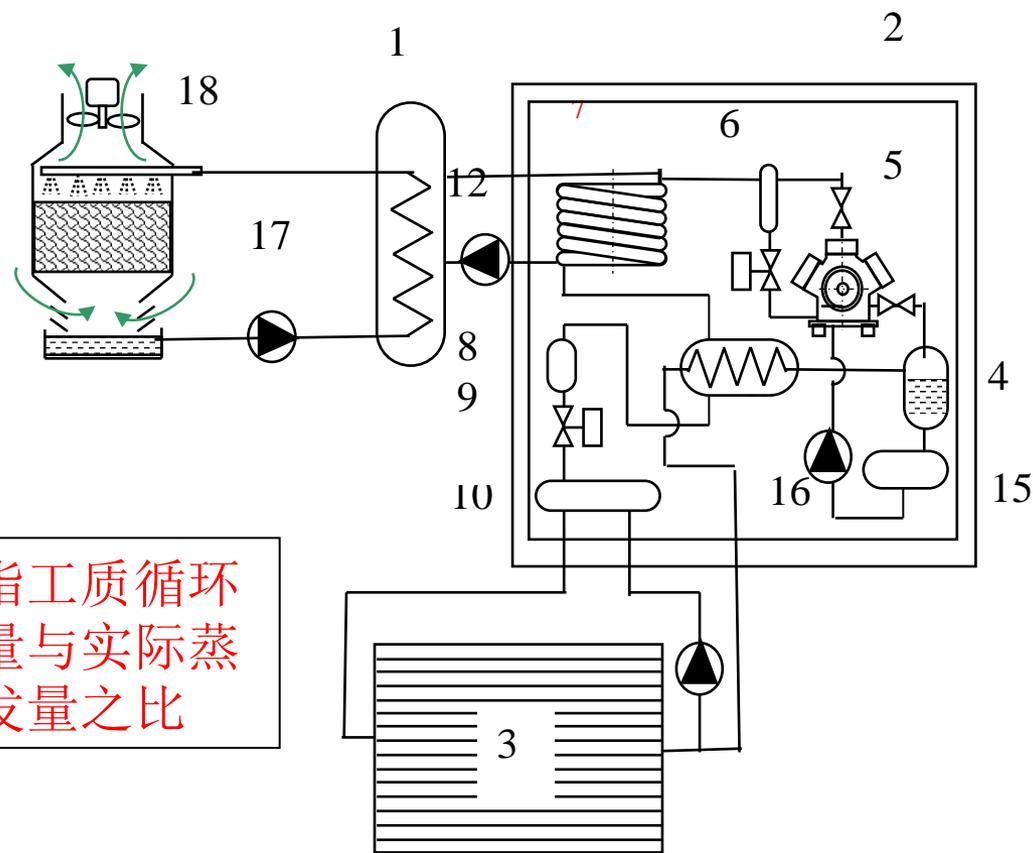
- 冬奥会标志性建筑国家速滑馆设计高度33米，主场馆建筑面积约8万平方米，冰面面积约1.2万平方米。
- 国家速滑馆设置400米大道速滑道及短道速滑、冰球、花样滑冰赛道，设有座位12000个。国家速滑馆采用全冰面设计，冰面温度可调范围为 $-6^{\circ}\text{C} \sim -11^{\circ}\text{C}$ ，室内设计温度控制在 $15^{\circ}\text{C}$ 左右。
- 整个400米冰道冰面温度误差不超过 $1^{\circ}\text{C}$ ，冰场冰表面多处设置温度传感器，控制精度高，确保冰面温度恒定。

# CO<sub>2</sub>跨（亚）临界直接蒸发式冰场主机特点



- 主机为多台活塞式压缩机组成，油分离器、气体冷却器、干燥过滤器、电子膨胀阀等可分散布置。
- 蒸发器有工质泵，流量比1.5~2。
- 回热器控制工质过热度并再次分离油。
- 充分利用气体冷却器热量。浇冰、采暖、热水。
- 全年平均COP=6.5。

指工质循环量与实际蒸发量之比

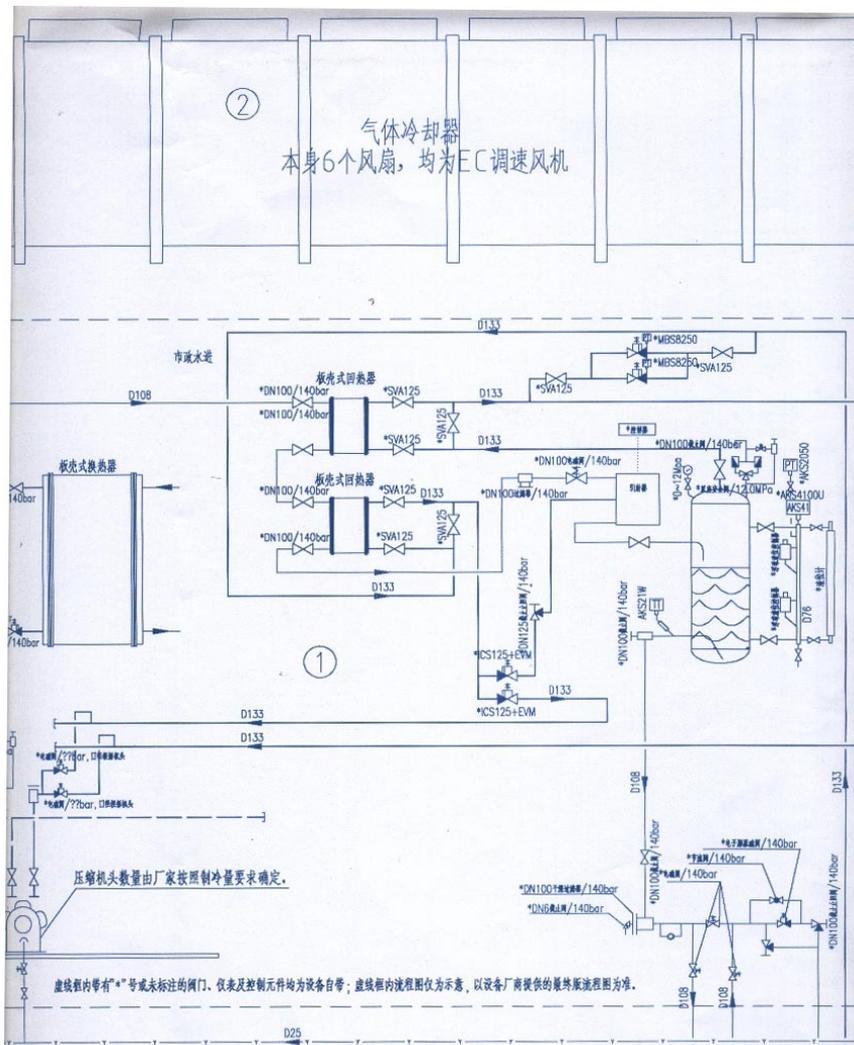


1-水箱 2-型钢框架 3-蒸发器 4-气液分离器 5-压缩机 6-油分离器  
7-回油控制阀 8-气体冷却器 9-干燥过滤器 10-电子膨胀阀 11-低压储液罐  
12-工质泵 13-回热器 14-水泵 15-储油罐 16-油泵 17-水泵 18-冷却塔

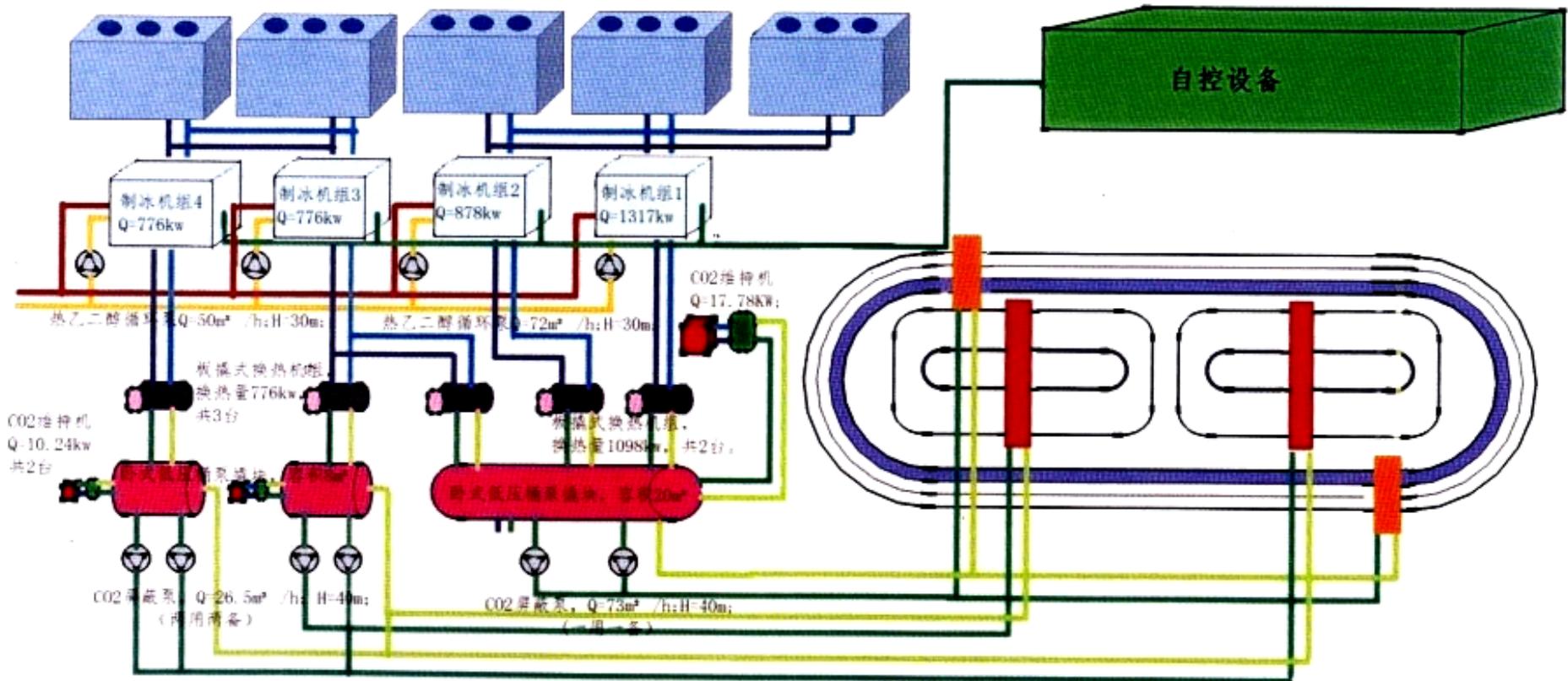
图 CO<sub>2</sub>跨（亚）临界直接蒸发式冰场系统图

# CO<sub>2</sub>跨临界直接蒸发制冰机组

国家速滑馆由6套CO<sub>2</sub>跨（亚）临界制冰机组组成，每套有10台CO<sub>2</sub>活塞式压缩机，可根据负荷大小调节压缩机个数和机组个数。



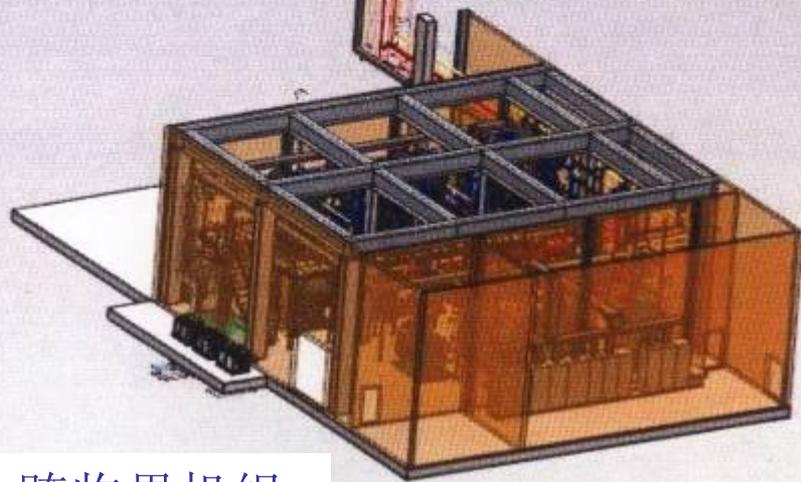
# 国家速滑馆工程示意图



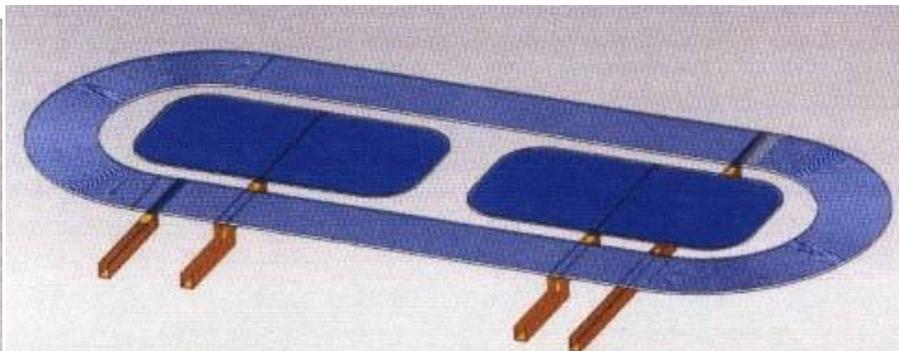
# CO<sub>2</sub>跨临界机组的冷热联用



气体冷却器



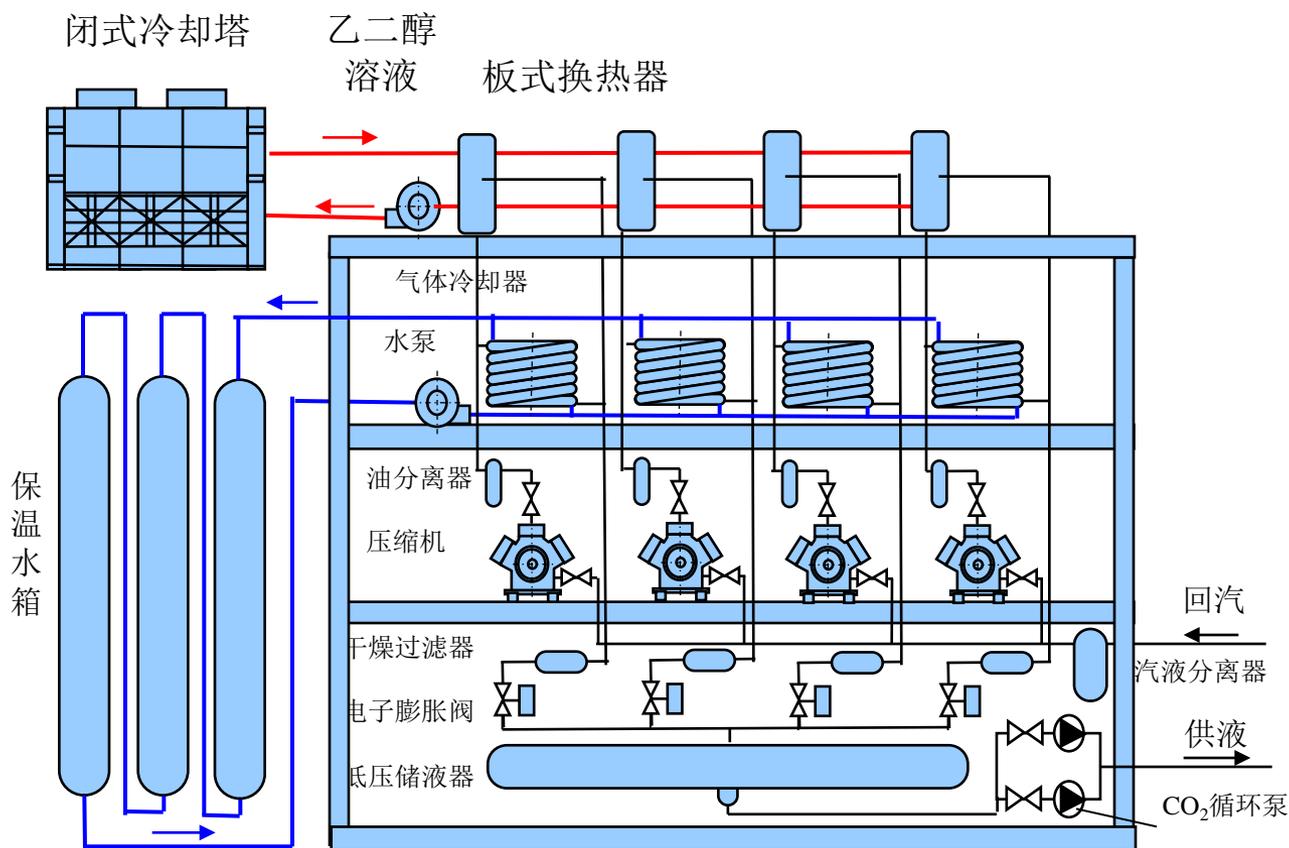
CO<sub>2</sub>跨临界机组



冰场即蒸发器

- CO<sub>2</sub>跨临界制冷机组可以回收气体冷却器的余热，以60~90℃热水形式，用于冰场的浇冰、除湿、生活热水、采暖和地下恒温等，大大提高了能源效率。

# 多机头CO<sub>2</sub>跨（亚）临界制冷热泵机组



# CO<sub>2</sub>跨（亚）临界制冷的优点

CO<sub>2</sub>

- CO<sub>2</sub>存在于大气、水体和地下，是自然界的组成部分。
- CO<sub>2</sub>是温室气体，但每kg的温室效应是1，而通常合成制冷剂（氟利昂）kg的温室效应是2000甚至更高。
- CO<sub>2</sub>是优良的制冷剂，它的容积制冷能力是通常氟利昂的5—7倍。
- CO<sub>2</sub>无毒不燃，是最安全的制冷剂。
- 其价格为0.5元/kg，而合成制冷剂为几十元~数百元/kg。
- CO<sub>2</sub>流动阻力小，冰块温度更为均匀。



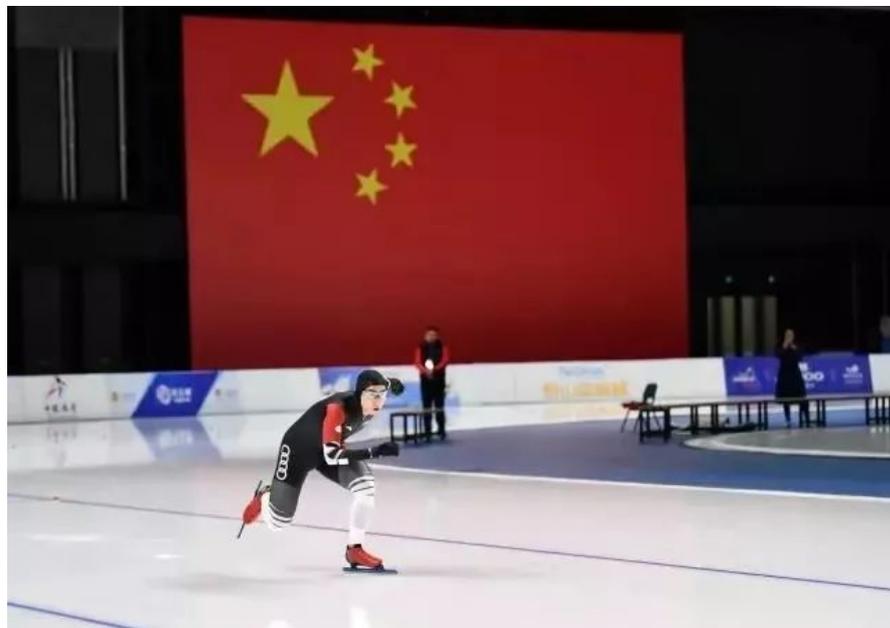
# 国家速滑馆、各预赛和训练冰场 施工都已完工，进入使用



- 不光是国家速滑馆，北京2022年冬奥会预赛场馆和运动员训练基地，包括首都体育馆，原二七机车厂训练基地（CO<sub>2</sub>载冷剂大道速滑冰场）等，北京赛区15块冰面有一半以上是二氧化碳跨临界直冷制冰冰面，都已完工。



首都体育馆



二七机车厂训练基地

# 国家雪车雪橇运动中心—— 一条氨制冷的冰雪长龙



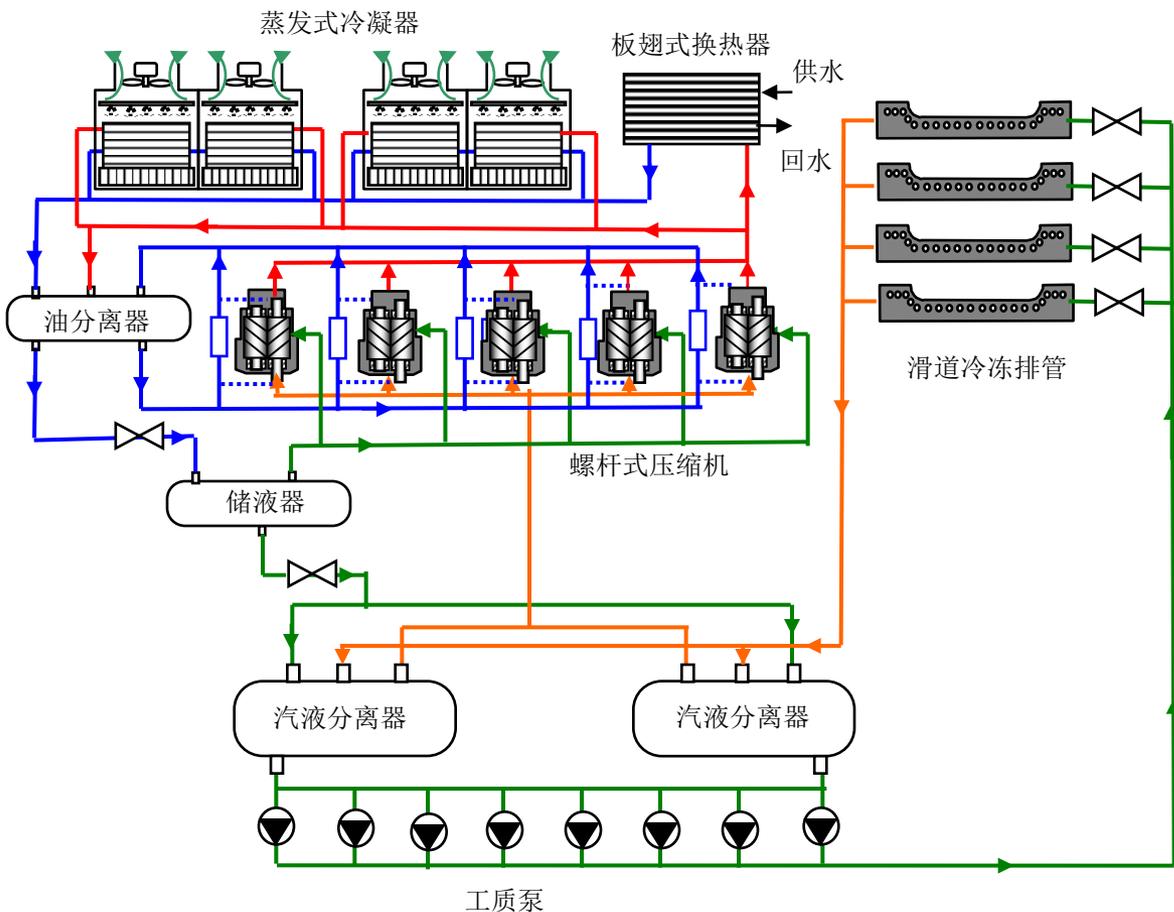
■ 国家雪车雪橇中心位于北京延庆区西北部山地，是我国首条雪车雪橇赛道，如下图所示。赛道全长1975m，垂直落差超过121m。雪车雪橇赛道的冰面采用了氨直接蒸发制冰方式，通过在赛道中埋设制冷管道，对赛道进行制冰并维持冷量。



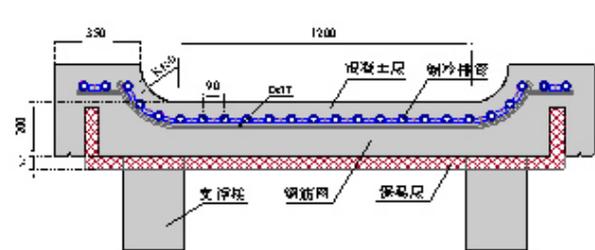
# 国家雪车雪橇运动中心简介

- 包括5台螺杆式氨制冷压缩机组、包括2台蒸发式冷凝器以减少水资源的使用、板壳式换热器（热回收用）、节流装置、2台氨气-液分离器2组，单个有效容积达到 $96\text{ m}^3$ 。制冷系统氨液总充灌量约为 $100\text{ t}$ 。、8台氨泵（4用4备）、热虹吸装置、经济器以及若干制冷单元（即赛道侧蒸发冷却排管）组成。
- 制冷系统蒸发温度： $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。总制冷量达到 $6,000\text{ kW}$ （保证在室外环境温度 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下可以使用）；单台压缩机额定制冷量 $1044\text{ kW}$ ，轴功率 $360\text{ kW}$ ，额定输气量 $2257\text{ m}^3/\text{h}$ 。裸露赛道冰面温度为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}\sim-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，冰面厚度 $50\text{ mm}$ 。在不考虑泵功率的情况下，在 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}/35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 工况下制冷COP（Coefficient of Performance）为3.12。
- 系统基本是室外开阔空间，对于氨系统有严格的安全措施。
- 本项目设置废热再利用系统，赛道运营时将冷凝热进行能量提升，可满足赛区约 $10,000\text{ m}^2$ 的室内采暖需求。如果热量全部回收利用，综合COP=6~8。

# 国家雪车雪橇运动中心主机



国家雪车雪橇运动中心主机系统图



水平滑道的施工图



滑道蒸发管的施工

# 国际奥委会主席巴赫表彰



- 2021年3月0日国际奥委会第137次全会上，国际奥委会主席巴赫在开场致辞时表示，虽然面对新冠疫情的挑战，但现在可以非常自信地说，北京冬奥组委已经准备好了！



## 3亿人上冰雪，冰雪运动潜力无穷

- 习主席代表中国向国际奥委会承诺“3亿人上冰雪，冰雪运动走出东三省，要南展西扩”。
- 未来冰雪运动不仅增强人民体质，也推动冰雪运动产业，将拉动国民经济的发展，使中国的制冷行业做大做强。
- 各种永久式、半永久式滑冰场、模块式冰场或室内滑雪场将会像雨后春笋一样出现在中国。
- 各省市自治区和较大的城市体育中心，大中小学运动场都可能配备人工冰场。
- 冰雪运动产业在中国刚刚兴起，尤其自然工质氨和CO<sub>2</sub>制冷与热泵工业正在旭日东升，潜力无穷。

# 结论

- 发展CO<sub>2</sub>亚临界、跨临界循环和载冷剂循环，氨制冷循环对我国发展广泛的冰雪运动，兑现“3亿人上冰雪”有重要意义。
- 开展CO<sub>2</sub>制冷循环和冰雪运动装置的产学研合作，大力开展CO<sub>2</sub>跨临界循环热泵国际合作，创造CO<sub>2</sub>制冷冰雪运动的新兴产业。
- 我国作为发展中的大国已经向世界宣布，二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和。2022年冬奥会体现了绿色高效技术。

谢谢!