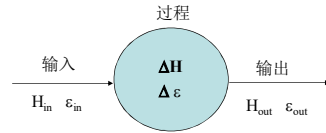


能量的利用效率、有效功

物质的能量：量 H (Enthalpy) 和质 ϵ (exergy)



独立系统： $\sum_j \Delta H_j = 0$
 $\sum_j \Delta \epsilon_j \leq 0$

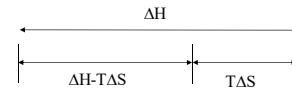
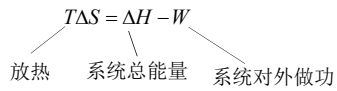
有效能 (exergy 火用)

热力学第一定律：能量守恒
 热力学第二定律：熵增原理

$$\Delta S = S_B - S_A > \int_A^B dQ/T$$

可逆过程：

$$\Delta S = S_B - S_A = \int_A^B dQ/T, \quad dS = dQ/T$$



有效功换算系数： $\times 1$ $\times \frac{T - T_0}{T}$
 有效功： $\Delta H - T\Delta S$ $(T - T_0)\Delta S$
 合计： $\Delta H - T_0\Delta S = \Delta \epsilon$

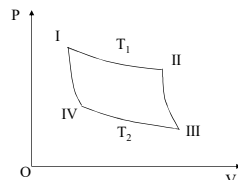
能量的质： $A = \frac{\Delta \epsilon}{\Delta H}$

卡诺循环

等温膨胀—绝热膨胀—
 等温压缩—绝热压缩

效率：

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$



卡诺定理—任何热机的效率不能超过工作在与其热源温度相同的可逆机的效率，而热源温度相同的可逆机的效率相等。

$$W = Q_1 - Q_2 = (T_1 - T_2)(s_2 - s_1)$$

$$\eta = W/Q_1 = 1 - Q_2/Q_1 \leq 1 - T_2/T_1 \quad (\text{可逆机等号成立})$$

不同能量种类的质：

热能 $A_f = 1 - \frac{T_0}{T}$

机械能、电能 $A_w = 1$

化学能等 < 1

有效能的损失：

高温物体给低温物体加热

电热壶、电炉

例：加热或冷却

$$W = 0 \quad T\Delta S = \Delta H$$

$$\Delta H = \int_{T_1}^{T_2} \left[\sum_j n_j C_{p,j} \right] dT$$

$$\Delta S = \int_{T_1}^{T_2} \left[\sum_j n_j \frac{C_{p,j}}{T} \right] dT$$

$$\Delta \epsilon = \int_{T_1}^{T_2} \left[\sum_j n_j C_{p,j} \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \right] dT$$

能量的质：

$$A = \frac{\Delta \epsilon}{\Delta H} = 1 - \frac{T_0}{T_{av}} \quad T_{av} = \frac{T_2 - T_1}{\ln T_2 - \ln T_1} \approx \frac{T_2 + T_1}{2}$$

例：俄亥俄烟煤的燃烧（煤的热值：12800Btu/lb）

燃料分析：重量百分比

碳	72.0
氢	4.4
硫	1.6
氧	3.6
水	8.0
灰分	9.0
总计	100

总空气量 120%

烟道气出口温度 $T_2=174^\circ\text{C}=447\text{K}$

基准环境温度 26°C

烟道气损失：

CO ₂	150Btu/lb
O ₂	26Btu/lb
N ₂	579Btu/lb
空气中水分	18Btu/lb
燃料中水分（显热+潜热）	551Btu/lb
未燃烧碳+1%灰分	155Btu/lb
未燃烧一氧化碳	135Btu/lb

烟道气总损失 1614Btu/lb (12.6%)

$T_0\Delta S=3822\text{Btu/lb}$ $\Delta \epsilon=1614+3822=5439\text{Btu/lb}$

例：化学反应



$$\Delta H_{(T)}^0 = ch_{c(T)}^0 + dh_{d(T)}^0 - ah_{a(T)}^0 - bh_{b(T)}^0$$

$$\Delta S_{(T)}^0 = cs_{c(T)}^0 + ds_{d(T)}^0 - as_{a(T)}^0 - bs_{b(T)}^0$$

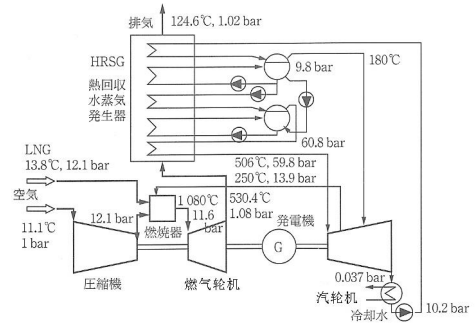
$$\Delta \epsilon_{(T)}^0 = \Delta H_{(T)}^0 - T_0 \Delta S_{(T)}^0$$

近似条件：

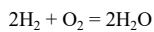
生成物与反应物的差值 ΔH , ΔS , $\Delta \epsilon$ 与温度无关

↓
直接用标准温度 T_0 下的值进行计算

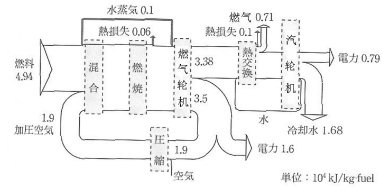
例：LNG复合发电系统



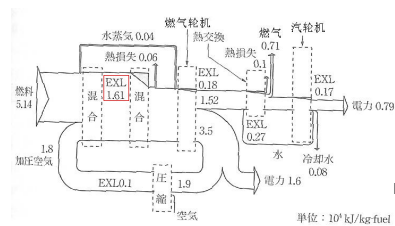
氢氧燃烧生成水的反应



$$\Delta \epsilon = \text{燃烧生成热} - T_0(s_{\text{H}_2\text{O}} - 2 \times s_{\text{H}_2} - s_{\text{O}_2})$$



能流图

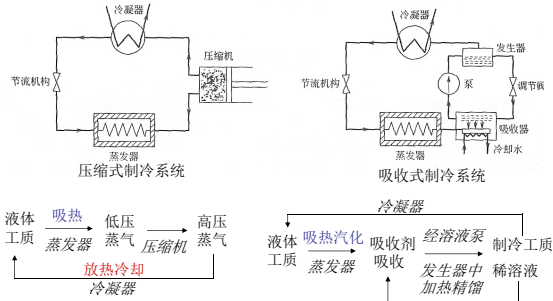


Exergy流图

冷冻机和热泵

物质相变制冷:

制冷剂在低压下蒸发汽化(吸热)、蒸气升压、高压气体液化(放热)和高压液体降压。



机械能驱动可逆制冷机:

$$Q_0 + W = Q_a$$

在两个恒温热源间工作的可逆机, 一个循环的熵增等于零, 即

$$Q_a/T_a = Q_0/T_0$$

可得:

$$\eta_{vc} = \frac{Q_0}{W} = \frac{1}{\frac{T_a}{T_0} - 1}$$

热能驱动可逆制冷机:

$$Q_0 + Q_g = Q_a$$

$$Q_a/T_a = Q_0/T_0 + Q_g/T_g$$

$$\eta_{rc} = \frac{Q_0}{Q_g} = \frac{1}{\frac{T_a}{T_0} - 1} \cdot \left(1 - \frac{T_a}{T_g}\right)$$

压缩式制冷系统

制冷剂: ~~CFC~~ (氯氟烃)、~~HCFC~~ (含氯氟烃)

HFC (含氢氟烃, 不含氯)、氨、二氧化碳等

吸收式制冷系统

制冷剂/吸收剂: 氨/水、水/溴化锂、硅胶/水

热源: 蒸汽、75°C以上热水、燃气、工业余热、废热、太阳能热、地热等

空调性能指标

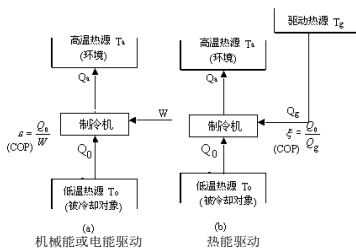
(我国将制冷、制热性能分别用不同名词表征)

能效比 (EER: energy efficiency Ratio)

在额定工况和规定条件下, 空调器进行制冷运行时, 制冷量与有效输入功率之比, 单位为W/W

性能系数 (COP: coefficient of performance)

在额定工况和规定条件下, 空调器进行热泵制热运行时, 制热量与有效输入功率之比, 单位为W/W



性能系数 COP (Coefficient of Performance)

$$= Q_0/W \quad (\text{机械能或电能驱动})$$

$$= Q_0/Q_g \quad (\text{热能驱动})$$

空调性能指标

中国 (2005年3月起, 2级现为节能型、2009年起为限定标准):

类型	额定制冷量 (CC)/W	能效等级				
		5	4	3	2	1
整体式	CC ≤ 4 500	2.30	2.50	2.70	2.90	3.10
	4 500 < CC ≤ 7 100	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40
分体式	4 500 < CC ≤ 7 100	2.50	2.70	2.90	3.10	3.30
	7 100 < CC ≤ 14 000	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20

(2009年空调入市门槛将由现行的2.6的能效比提高到3.2)

日本节能型标准（2004~2007年）：

制冷能力	~2.5kW	~3.2kW	~4.0kW	~7.1kW
壁挂式	5.27	4.9	3.65	3.17
地面、吊顶	3.96	3.96	3.20	3.12

省エネ基準達成率表示について

このマークは商品の省エネルギー性能基準に対する達成率およびエネルギー消費効率（APFまたはCOP）を記載してある場所を明示するものです。商品を選択するときに参考にしてください。

省エネ基準は2004年省エネ基準および2007年省エネ基準について表示しています。達成率（省エネ達成率）は、省エネマークの色で示されています。

エアコンの省エネ基準は、その機種・形態・寸法に応じて異なる評価基準が適用され、それぞれの目標値が定められています。

【冷蔵庫・製氷機形 4.0kW以下の商品】

目標年度	2010年度		2013年度	
商品区分（消費電力[W]	冷蔵庫・製氷機形	~2.5kW	~4.0kW	~7.1kW
目標達成率（APF達成率）	平均達成率	5.8	4.9	3.17
	実達成率	5.8	5.8	3.20

【その他の商品】

目標年度	2010年度		2013年度	
商品区分（消費電力[W]	冷蔵庫・製氷機形	~2.5kW	~4.0kW	~7.1kW
目標達成率（COP達成率）	平均達成率	3.17	4.12	3.20
	実達成率	3.17	4.12	3.20

● 省エネマークの表示方法
 APFはJIS C 9812に基づき、ある一定の条件のもとにエアコンを運転したときの消費電力（1時間分の消費電力）を測定したものです。省エネマークは、省エネマークで定められた目標値に対する達成率を算出して表示されています。

● 省エネマークの表示方法
 COPはJIS C 9812に基づき、ある一定の条件のもとにエアコンを運転したときの消費電力（1時間分の消費電力）を測定したものです。省エネマークは、省エネマークで定められた目標値に対する達成率を算出して表示されています。

Exergy环境税

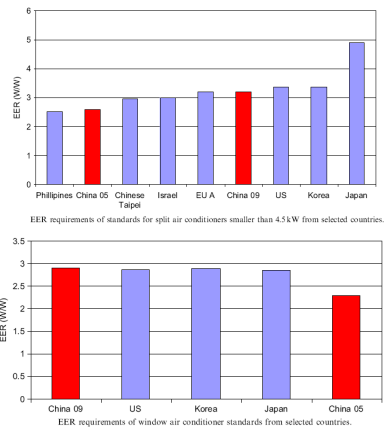
提案：根据exergy的损失征税（ExTB: Exergy Tax Base）

$$ExTB = \sum_j (E_{原料,j}) + \sum_j (E_{废弃处理辅助原料,j}) - \sum_j (E_{副产品,j}) - E_{制品}$$

- 总exergy $E = \varepsilon \times k_s + \varepsilon_0$
 k_s : 附加价值指数（一般为1，稀缺物质>1）
 ε_0 : 基准exergy

- 可再生物品
 $ExTB = \sum_j (E_{原料,j}) + \sum_j (E_{废弃处理辅助原料,j}) - \sum_j (E_{副产品,j}) - E_{制品} + REF_0$
 返还金: $REF = \sum_j (E_{再生物品,j}) + REF_0$

各国空调参数对比



- 利用可再生能源税收扣除率 D_{re}
 $E = E'(1 - D_{re})$
- 利用可再生物质的扣除率 D_{rm}
 $E = E'(1 - D_{rm})$

系统可持续性指标:

总体Exergy回收率 = $E_{制品} / E_{原料}$
 回收率 = 再生品质量 / 原料质量
 可再生能源利用率 = $E_{可再生能源} / E_{原料}$

吸收冷冻机性能指标:

- 直燃型（川崎1.26-1.37、最高1.75）
 优点：可利用重油、天然气等
- 废热利用型（~1）
 优点：可利用低温热
 缺点：热交换器庞大
- 低温热（0.5~1）

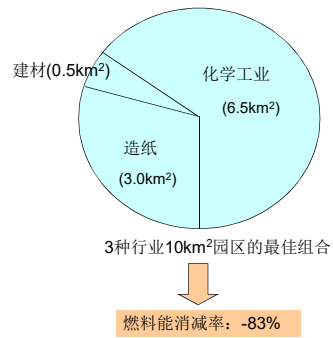
热泵（Heat pump）：逆行制冷机

例

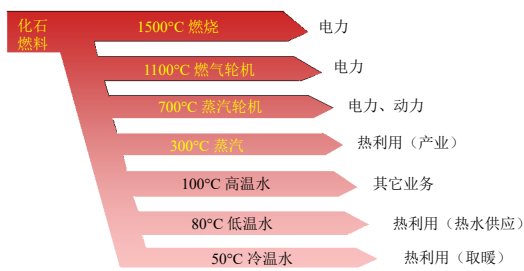
- 火力发电 1kJ的Exergy的燃料发电0.42kJ
 $1kJ$ 电力的环境税 $ExTB = 1/0.42 - 1 = 1.38kJ$
 因电力为容易使用的能源，若 $k_s = 1.3$ ，则
 $1kJ$ 电力的环境税 $ExTB = 1/0.42 - 1 \times 1.3 = 1.08kJ$
- 产业电力消费
 $1kJ$ 电力的环境税 $ExTB = 1 \times k_s$
- 家庭电力消费
 设定一个基本消费量 $\varepsilon_0 = 1.3GJ/人/月$
 $ExTB = 每人每月用电量 \times k_s - \varepsilon_0$

热能的阶梯利用 和热电联产

产业间的能量多阶段利用



排热的多阶段 (Cascade) 利用



冷热电联产

大型电厂废热利用

优点: 发电效率高、环保性好 缺点: 远离市区、废热难以利用

热电厂

常规热电厂指标

机组容量 (MW)	热电比 (%)	全年热效率 (%)
<50	>100	45
<200	>50	45
>200	>50 (采暖期)	45

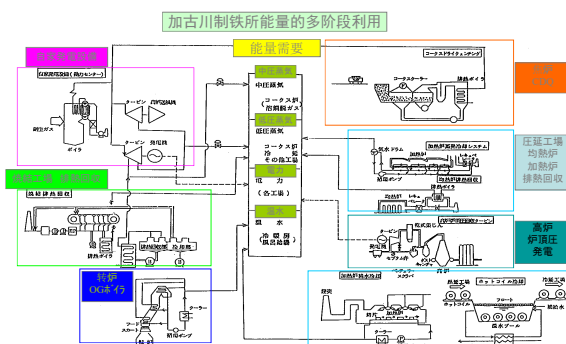
燃气轮机热电联产指标: 热电比>30%、热效率>55%

热电比=供热量/供电量

总热效率=(供热量+供电量×3600kJ/kWh)/总燃料低位热值

1997年底我国的热电机组装机容量为21970MW, 同期火电机组总容量为181.2GW, 热电机组占12.12%。1999年60MW以上的机组容量增至28153MW。

工厂内部的节能形式



蒸汽轮机热电联产

燃料: 化石

虽然蒸汽轮机价格较低, 但锅炉成本高、燃料处理费用高, 系统组成复杂。适用于大中型热电联产。

电效率可能很低。

1. 背压式汽轮机

利用排气供热

热能利用效率高, 结构简单, 投资小

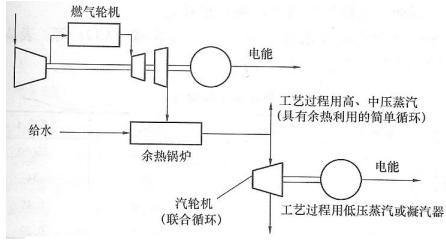
以热定电, 热和电不能独立调节, 需稳定可靠热负荷

2. 抽汽式汽轮机

热电负荷可独立调节, 运行灵活。

燃气轮机热电联产

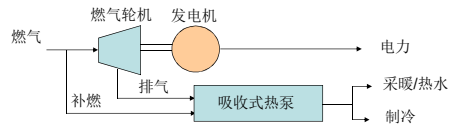
燃料：天然气等



没有补燃的燃气轮机联合循环

发电效率较高

冷热电三联产示意图：



燃气轮机

燃料：天然气，煤层气，沼气
优点：效率高、占地小、小型分散化

问题点：

冷热需求的季节变动
电、热的质不相同

热电联产的经济指标

总热效率 = (供热量 + 发电量 × 3600 kJ/kWh) / (燃料总耗量 × 低位发热量)

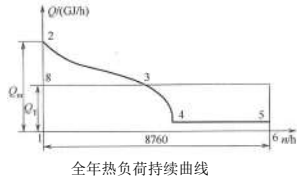
热电比 β = 供热量 / (发电量 × 3600)

热化系数：供热机组最大供热能力与系统最大热负荷之比

小时热化系数 = Q_T / Q_m

年热化系数 = 面积1834561 / 面积1234561

$Q_m - Q_T$ 部分：辅助锅炉



微型燃气轮机 (Micro gas-turbine)

几种主要产品

制造商	Honeywell	Elliott	Capstone Turbine
型号	Turbo generator	TA45	Model 330
额定发电容量 (kW)	75	45	30
发电效率 (%)	28	30	26
涡轮转速 (rpm)	65,000	116,000	96,000
轴承形式	空气	油	空气

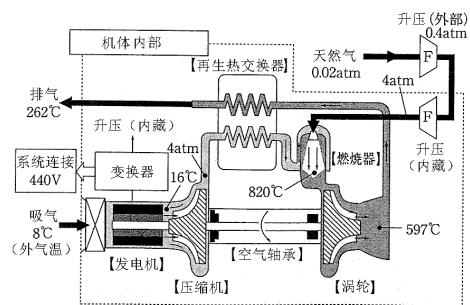


小型热电联产的性能、价格比较

工艺方式	柴油机	燃气内燃机	燃气轮机	微型燃机	燃料电池
技术状况	商业运行	商业运行	商业运行	商业化	2010年*
容量 (kW)	20-10000+	50-5000+	10000+	30-200	50-1000+
电效率	36-43%	28-42%	25-42%	25-30%	35-55%
总效率	70-80%	85%	85%	80%	80%
设备造价 (元/kW)	1000-2500	2000-5000	2500-5000	3000-6500	1.2-2.5万
工程总包造价 (元/kW)	3000-4500	5000-8000	5500-7500	5000-1万	1.5-3万
余热回收加价 (元/kW)		625-1250	800-1600	625-2900	已包括
运行管理成本 (元/kWh)	4.2-8.3	6-13	2.5-6.5	4.2-8.3	4.2-8.3

(大型热电联产机组类型还包括蒸汽轮机)

微型燃气轮机原理图

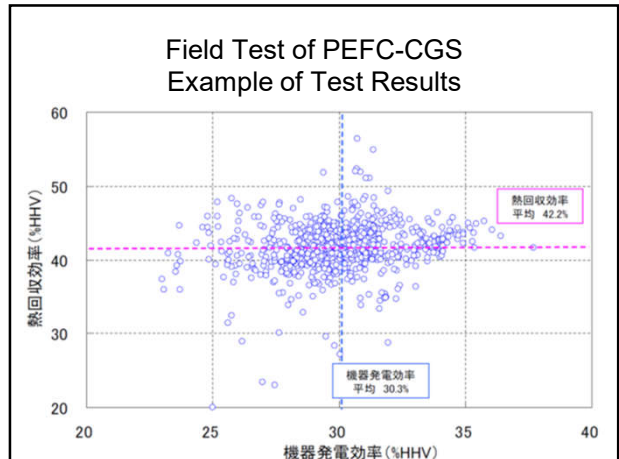


微型燃气轮机用途

- 分散电源 (热电联产)
- 热、电消费匹配 → 蓄热槽
- 预备电源、可移动电源
- 偏远地区独立供电

缺点:

- 发电效率低



Residential Co-Generation System using Polymer Electrolyte Fuel Cell (PEFC)

in May/2009

City Gas type

Capacity: 1kW_e
Efficiency:
 η_e : 37%+(LHV)
33%+(HHV)
 η_h : 52%+(LHV)
47%+(HHV)
Price: 3,465,000 JPY

LPG type

Capacity: 1kW_e
Efficiency:
 η_e : 35%+(LHV)
 η_h : 50%+(LHV)
Price: 3,400,000 JPY

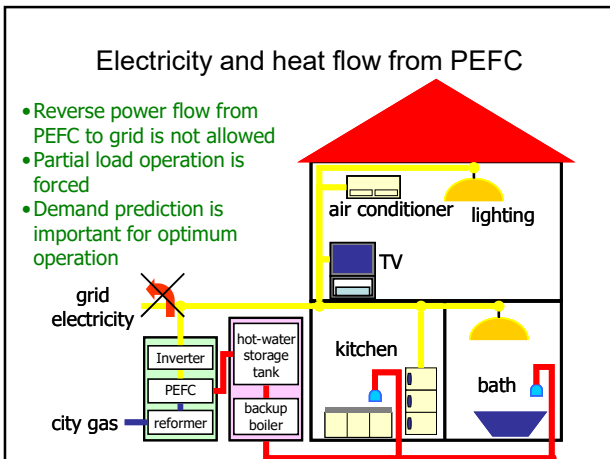
Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)

- High efficiency
 - 49% (1 kW system) Osaka Gas Co. Ltd. & Kyocera
 - 45% (100 – 200 kW system) Siemens power, Mitsubishi Heavy Industries LTD.
- available for mono generation
- Internal reforming
 - simple configuration without reformer
- High temperature exhaust
 - Small capacity of hot-water tank
 - steam generation for combined cycle

<Challenging issue>

- Measure for heat cycle of high working temperature

Anode: $H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$
Cathode: $1/2O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$
Overall: $H_2 + 1/2O_2 \rightarrow H_2O$



KYOCERA SOFC CGS for Residential Use

SOFc発電ユニット
凉セツ/大気ガス共回調発

排熱利用給湯暖房ユニット
長絞条件種/大気ガス 共回調発

メーカー	京セラ株式会社
外形寸法	高さ960mm幅570mm奥行350mm
重量	93kg
発電出力	定額 700W
	最小 100W以下
発電効率	定額 45% (LHV)
排熱回収率	定額 40% (LHV)
排熱回収温度	定額 75℃

メーカー	株式会社 長府製作所
外形寸法	高さ1700mm幅700mm奥行300mm
重量	89kg
貯湯タンク容量	70L
給湯	能力 41.9 kW (24号)
追いだし	能力 12kW (10,300kcal/h)
	容量 17.4kW (15000kcal/h)
暖房	能力 6.4kW (7,200kcal/h)

相关名词:

热电联产 CHP combined heat and power system, cogeneration
 冷热电联产 CCHP combined cooling, heating and power system
 区域供暖 DH district heating
 区域供冷系统 DCS district cooling system
 区域供热供冷 DHC district heating and cooling
 建筑冷热电联供 BCHP building ...
 分布式能源站 DES

日本建筑物冷热电联产的形式 (至2003年初)
 DES profile in Japan at 2003

	安装项目数	总装机容量 (MW)	平均装机容量 (kW)
燃气轮机	299	327.9	1097
燃气内燃机	2351	485.7	207
内燃机	1912	615.6	322

目前已5500座 (1999年仅142座)

类型	商场	医院	酒店	办公建筑	运动场所	学校	区域供冷供热
装机容量MW	264	213	219	193	94	42	81
数量	497	460	440	289	236	77	21

多用于公共建筑, Most are for public building

冷热电联产的发展概况



分布式能源站在欧洲 Progress of DES in EU

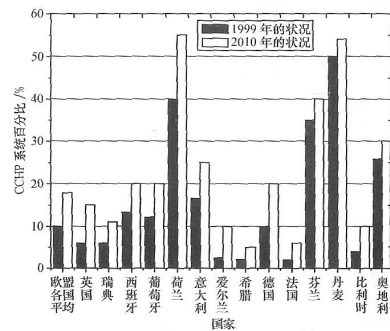
- 法国Dalkea在欧洲经营200多个分布式能源站
- 荷兰一公司在欧洲经营分布式能源站1000多个
- 各国能源构成、价格不同, DES发展条件不同
- 欧洲各国普遍重视通过提高能源利用效率、发展可再生能源来保护环境

美国建筑物冷热电联产的形式 (1999年)
 DES profile in U.S. at 1999

系统形式	装机容量, MW	容量比例 (%)	系统数量 (座)	数量比例 (%)	平均装机容量 (MW)
联合循环	2110	42.8	27	2.8	78.1
锅炉/蒸汽	1341	27.2	60	6.1	22.4
燃气轮机	933	18.9	104	10.6	9.0
内燃机	506	10.3	770	78.6	0.7
其他	36	0.7	19	1.9	1.9
总计	4926	100	980	100	5.0

- 2010年: 20%新建商用、写字楼类建筑物使用CCHP
 - 5%现有商用、写字楼类建筑物使用CCHP
 - 25%的美国能源部CHP项目用户使用CCHP
- 2020年: 50%新建商用、写字楼类建筑采用CCHP
 - 15%现有商用、写字楼类建筑采用CCHP

欧洲各国CCHP (CHP) 发展



中国的冷热电联供范例



- 150MW燃气-蒸汽联合循环系统
- 运行可调和灵活性，解决季节、昼夜和假期的不平衡
- 电制冷和冰蓄冷配合
- 暑假期间可上网发电调峰

未利用能源的灵活使用

未利用能源：低温排热，温差能等

江河湖海等天然水体以及城市生活废水等，冬季温度高于室外环境温度，夏季低于环境温度。其中储存的温差能可作为热泵的低位冷热源。水的比热较空气大，可缩小小交换器尺寸。

日本统计表明，利用海水冷却的空调冷源系统可以节能8.5%，利用排污水可以节能10%。

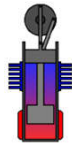
空气源热泵的工作环境有一定的温度范围（如一般空调要求）-5℃。如果能够利用温差能，可大大提升热泵工作环境范围。

废热发电

1. 斯特林发电机

热机(即斯特林发动机)的理想热力循环，由等温吸热、等容放热、等温放热和等容吸热四个可逆过程组成：

- (1) 低压低温工质在向外冷源放热的同时接受活塞定温压缩的过程；
- (2) 低温工质在定容条件下接受回热器对其进行定容加热的过程，压力和温度均相应升高；
- (3) 高压高温工质在向外热源吸热的同时，推动活塞对外作功的定温膨胀过程；
- (4) 高温工质在定容条件下向回热器进行定容放热的过程，压力和温度均相应降低并回复到初态，从而完成了一个闭式循环。



小型冷热电联产——分布式发电

1. 热电综合效率高、无输电损耗
2. 天然气为燃料可以减少CO₂及其他有害气体排放
3. 分布式电源可提高系统安全性
4. 可作为备用电源
5. 经济性

2. 热声发电

1878. Rayleigh准则：供热激发声振动的条件在于过程中的热量交换和工质运动之间存在合适的相位角，当气体被压缩时加热，膨胀时冷却，气体振荡会加强。

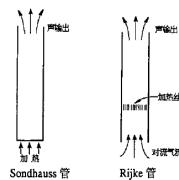
1999年，提出了一种新型结构的行波热声发动机，被称为热声斯特林发动机。荣获了当年的美国“R&D100”奖。

2010年，荷兰的Blok提出多级环流热声发动机。在以Ar为工质，压力为2.1MPa、冷端温差小于30K时即可起振。2012年，以0.75MPa的He为工质，可利用20kW的废热获得1.64kW声功。

2011年，荷兰能源研究中心的Tjani等。运行压力为4MPa，频率为130Hz。加热温度为580℃时获得280W的声功。其热声效率达32%。

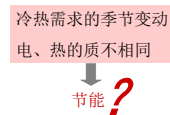
发电方式：

- 压电材料
- 驱动磁流体
- 驱动活塞（如：直线电机），热电转换效率：~ 19.8%（650℃）



Backhaus & Swift (2008) 的热声斯特林发动机

冷热电联产问题点：



例：“发电效率30%、总效率75%的燃气轮机热电联产机组”在总效率上等同于“大型超临界燃煤机组发电效率45%+cop=3的热泵”

- 节能效率取决于热电的匹配
 - 低发电效率的机组可以用于某些产业的蒸汽供给，单纯用于居民供热、冷，则未必节能。
- 经济因素
 - 单纯供热的热电厂在经济上也不如简单的锅炉供热
 - 电力及燃料价格
 - 初装费

- 电力市场自由度
- 在中国，还受到能源结构的制约，煤炭价格远低于天然气和石油，导致小型的以天然气和油为燃料的分布式功能设施难以推广。只有大型燃煤热电厂较为可行，但其设备投资较高。
- 在城市内部的大型燃煤热电厂的煤渣处理也是难题之一
- 大型燃煤机组难以实现高效率的大区域供冷（原因：供冷的损耗较大）

生活热水供应热负荷

$$Q_{hm} = KQ_{av} = KmV(t_{hw}-t_c)/T$$

Q_{av} - 生活热水平均负荷

K - 小时变化系数

m - 热水计算单位数（住宅为人数，公共建筑为每日人次）

t_{hw} - 热水温度

t_c - 冷水温度

T - 每日供水小时数

住宅 别墅	居住人数	100以内	150	200	250	300	500	1000	3000	>6000
	K	5.12	4.49	4.13	3.88	3.7	3.28	2.86	2.48	2.24
旅馆	床位数	150以内	300	450	600	900	1200以上			
	K	6.84	5.61	4.97	4.58	4.19	3.90			
医院	床位数	50以内	75	100	200	300	500	1000以上		
	K	4.55	3.78	3.54	2.93	2.60	2.23	1.95		

居民平均热水供应热负荷：2.5~3W/m² (住宅无热水设备，仅对公共建筑供热水时)
15~20W/m² (全部住宅有浴盆并供给热水时)

影响热电联产系统设计的因素

1. 负荷特性

— 用户类型、组成、负荷日变动特性

采暖热负荷

$$Q_h = (1+\mu)\chi V_0(t_i-t_w)$$

μ - 建筑物空气渗透系数，一般 $\mu=0$

χ - 建筑物采暖特性系数，温差1°C时单位体积每小时散热量

V_0 - 建筑物外围体积

t_i - 室内维持温度

t_w - 室外温度

面积热指标 $Q_h = q_s \times$ 建筑面积

[表] q_s 推荐值 (W/m²)

建筑类型	住宅	综合居住区	学校办公	医院托幼	旅馆	商店	食堂餐厅	影剧院展览馆	大礼堂体育馆
未采用节能措施	58-64	60-67	60-80	65-80	60-70	65-80	115-140	95-115	115-165
采用节能措施	40-45	45-55	50-70	55-70	50-60	55-70	100-130	80-105	100-150

生产工艺、动力热负荷

特点：热参数不一致。

低温供热 <130~150°C, 0.392~0.588MPa

中温供热 >130~150°C, 0.785~1.27MPa

高温供热 >250°C, 直接由大型锅炉蒸汽减压供热

用热设备较多时

$$\sum Q_i = Q'_i \varphi (1+F)$$

φ - 同期使用系数, $\varphi = 0.7 \sim 0.8$

F - 近期热负荷增长因素

通风热负荷

加热从室外进入的新鲜空气所需能量

$$Q_B = kcV_B(t_i-t_w)$$

k - 每小时换气次数

c - 空气比热容, 1.26kJ/(m³·°C)

V_B - 建筑物通风容积

可按采暖热负荷估算

$$Q_B = Q_h \times K_f \quad (K_f = 0.3 \sim 0.5)$$

热负荷图

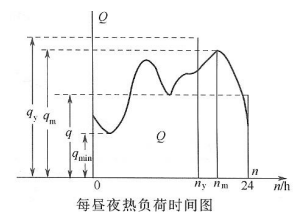
平均热负荷

热负荷系数

$$K = \text{平均热负荷} / q_m$$

热负荷利用小时数 n_y

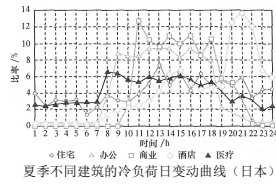
$$n_y \cdot \text{设计容量} = \text{总热负荷量}$$



冷负荷

同时使用系数

- 不同建筑的负荷时间、峰值差异
- 家用空调的同时使用系数
 - 小于100户, 0.7
 - 100~150户, 0.65~0.7
 - ~200户, 0.6
 - 整个小区, 0.5



建筑类型	冷负荷(W/m²)	建筑类型	冷负荷(W/m²)
办公楼、学校	95~115	商店	210~240
图书馆	40~50	医院	105~130
旅馆	70~95	剧院(观众厅)	230~350
餐厅	290~350	体育馆(比赛馆)	240~280

(2) 外部规则

— 电力的买卖价格、能源价格、环境管制等

例:

若电力卖价低, 则会促使DHC与用户形成联盟, 发电自用

运行方式从“热主电从”转向“电主热从”

(3) 新技术导入

— 太阳能利用、分布式发电、高效热泵、节能型住宅等

(4) 人的消费行为之间的互动

例: 在微型热电联产设备中, 引入洗澡时间的预设功能, 可以大大减小热负荷的不规则, 降低设备及蓄热容量和能耗。

典型负荷变化数据

- 不同建筑类型, 如学校、住宅、医院、商店、旅馆、办公楼等
- 一般分为冬、夏、春秋三类
- 每一类中还分平日与节假日两种

例1: 微型热电联产系统的优化

已知参数:

- $q(t)$ 单位时间的热负荷 (kcal)
- $e(t)$ 电力负荷 (kWh)
- K_{cgs} 设备容量 (kW)
- α 发电效率
- β 热回收效率
- γ 蓄热效率 (87%/day)
- η 电力系统综合效率 (0.4×0.96×0.95)

变量:

- $s(t)$ 蓄热量 (kcal)
- $\delta(t)$ 设备运行状态 (0:停止, 1:运行)
- E 一天的能源消费量 (kcal)
- $q_{cgs}(t)$ 单位时间设备供给热量 (kcal)
- $e_{cgs}(t)$ 单位时间设备发电量 (kWh)
- $f(h)$ 单位时间内设备燃烧用能与额定工况下用能的比值

目标函数:

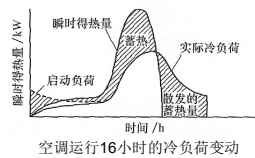
能源消费量

$$E = \frac{K_{cgs}}{\alpha} \times \sum_i f(t) + \frac{1}{\eta} \sum_i [e(t) - e_{cgs}(t)]$$

2. 其它影响因素

(1) 建筑结构等蓄热的影响

启动负荷大



对于负荷变动大的用户 → 蓄热蓄冷设施的优化问题

对于微型热电联产, 负荷变动情况需要精确到小时或分钟

制约条件:

$$s(t) = q_{cgs}(t) \times \delta(t) + \gamma \times s(t-1) - q(t)$$

$$\text{出力范围} \quad 0.40 \times K_{cgs} \times \delta(t) \leq e_{cgs}(t) \leq K_{cgs} \times \delta(t) \quad (\text{GE})$$

$$0.33 \times K_{cgs} \times \delta(t) \leq e_{cgs}(t) \leq K_{cgs} \times \delta(t) \quad (\text{FC})$$

部分负荷特性

$$q_{cgs}(t) = \frac{\beta}{\alpha} \times K_{cgs} \times [1.063f(t) - 0.063]$$

$$q_{cgs}(t) = \frac{\beta}{\alpha} K_{cgs} \times f(t)$$

$$e_{cgs}(t) = K_{cgs} \times [1.528f(t) - 0.528] \quad (\text{GE})$$

$$e_{cgs}(t) = K_{cgs} \times [1.063f(t) - 0.063] \quad (\text{FC})$$

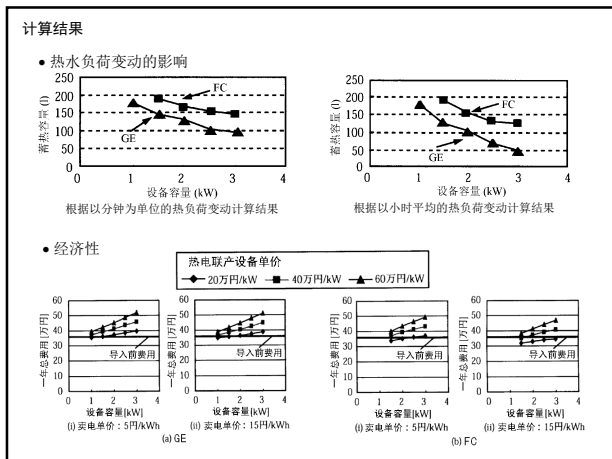
- GE和FC无法立刻启动或停止, 其运行状况以小时为单位
- 负荷(尤其是热水负荷)瞬时变动很大, 需要精确到以分钟为单位

其他评价指标:

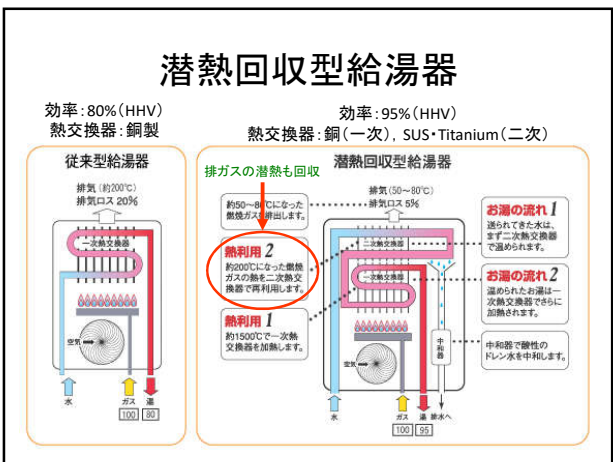
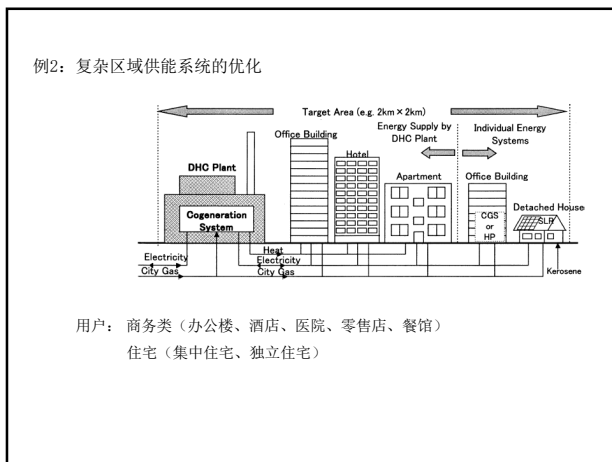
能耗减少率 = 1 - (导入后的能耗/导入前的能耗)

总费用 = 设备投资一年折减值 + 一年的电力、燃料费 - 卖电收入

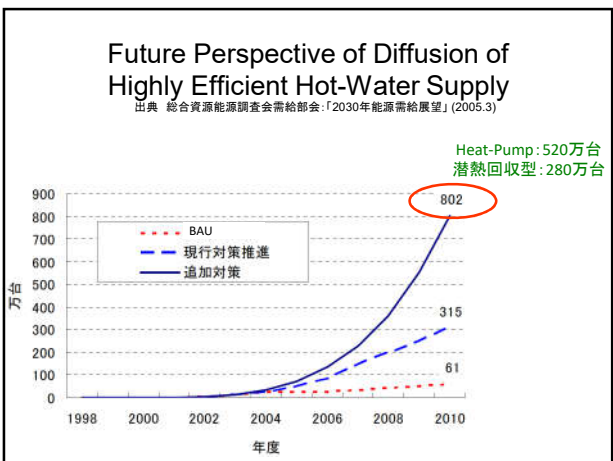
CO₂减排量: (能耗减少的部分 + 能源结构不同引起的差异)

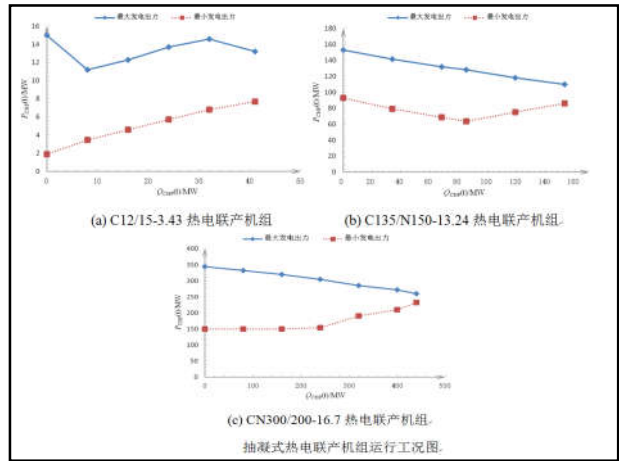
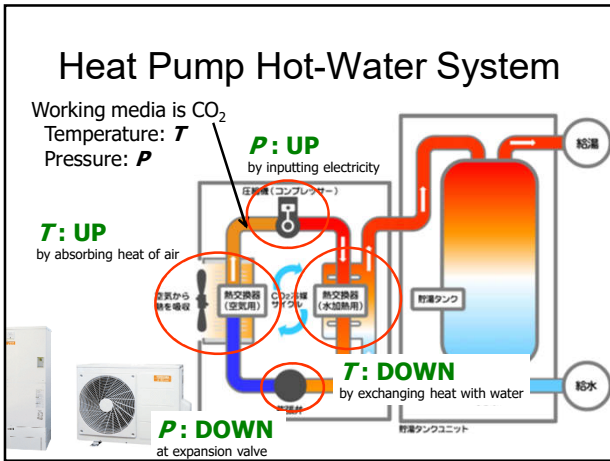


- ### 家庭住宅供热用技术
- 热电联产
 - 太阳能热水器
 - 新型热水器（废热回收型）
 - 热泵型热水器



- ### 需求侧能量消费管理与区域供能系统
1. 供能小区内建筑类型的优化配置
 2. 用户能源消费行为
 - 新技术导致能源消费的变化
 - 利用高效空调, 可实现热、电负荷的转化





- Power generation efficiency
 - generating-end: $\eta_g = 39.98\%$ (2150kcal/kWh)
 - Receiving-end: $\eta_r = 37\%$ (transmission loss, in-plant power)
 - Overall efficiency of HP $\eta_o = \eta_r \times COP$
 - $\eta_o = 111\%$ (COP=3.0)
 - $\eta_o = 92.5\%$ (COP=2.5)
 - Price: 800,000 JPY COP is small in cold area
HP is preferable in southern area
- Comparison with Latent Heat Recovery boiler
 efficiency: 95%
 price: 300,000~400,000 JPY

