

熱・高温



溶解炉の出鉄(JFE)

高温の世界

- 核融合炉のプラズマ温度 (1億℃)
- 原子爆弾 (数千万℃)
- 太陽の中心(核融合) (1500万℃)
- 太陽のコロナ (100万℃)
- 太陽の表面、地球の核 (約6000℃)
- アセチレン+酸素の炎 (3800℃)
- 次世代宇宙往還機燃焼器 (3000℃)
- 水素+酸素の炎 (2800℃)
- ガソリンエンジンの燃焼温度 (2500℃)
- ホットプレス、白熱電球 (2500℃)
- 溶融炉、HIP、核融合炉 (2000℃) 注)HIP=高温等方加圧焼結装置
- 超音速機エンジン燃焼器 (1900℃)
- 石炭ガス化炉 (1800℃)
- スペースシャトル大気圏突入時表面温度(8km/s) (1500℃)
- ローソクの炎 (1400℃)
- 溶解鉄 (1340℃)
- 溶岩 (1200℃)
- 新鋭火力発電の過熱蒸気 (600℃)
- ISWR 刈羽7号機蒸気 (284℃)
- 水の沸点(1気圧) (100℃)
- 地球上で測定の最高気温(58.8℃)
(イラク/バスラ 1921.7.8)
- 日本の最高気温 (40.9℃)
(岐阜県多治見市 2007.8.16)
- 高温超電導(Max) (-135℃)

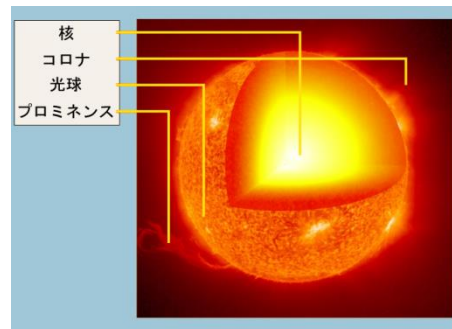


図42-1 太陽の構造 (Wikipedia)

国際度量衡委員会の「1990年国際温度目盛(ITS-90)」は実現しやすい温度定点をいくつか指定し、その間を補間する実験式を定めている

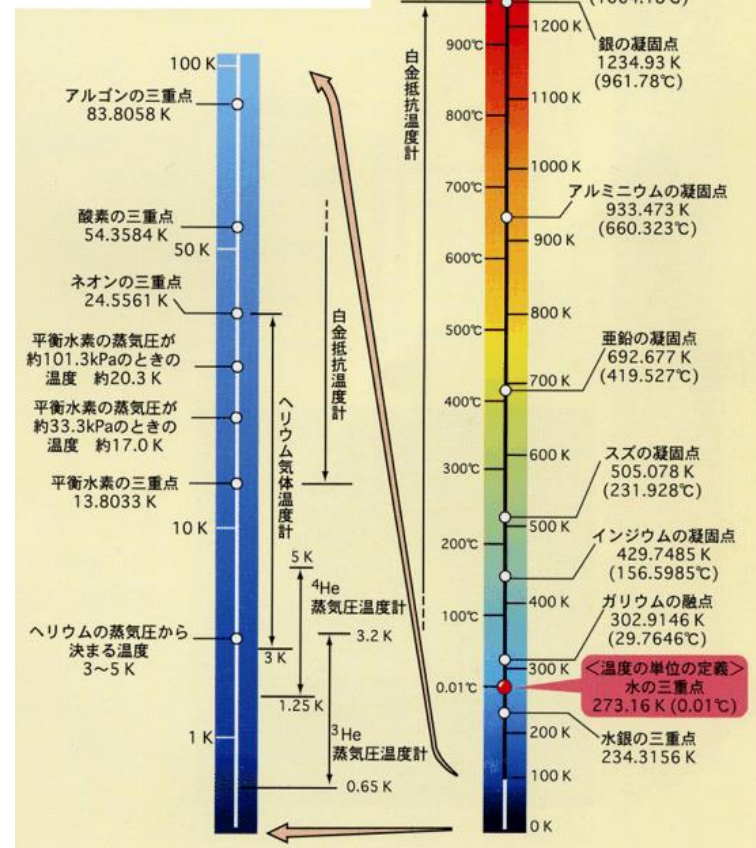
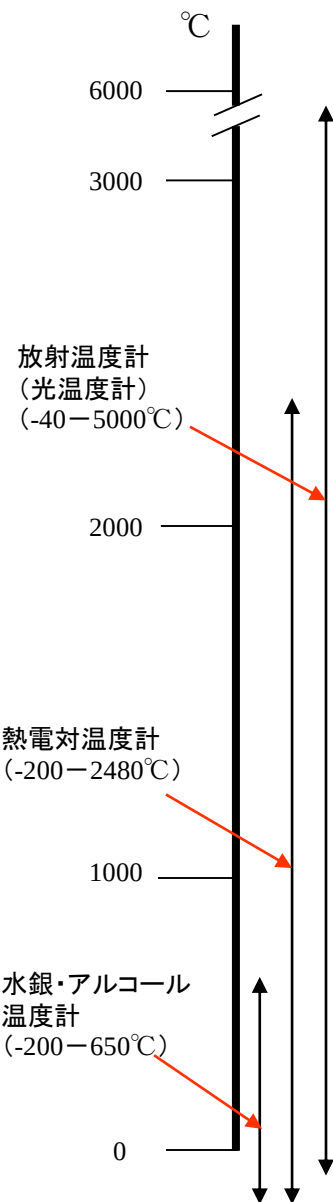


図42-2 1990年国際温度目盛の定義定点と補間温度計 (産総研 計量標準総合センター)

熱・温度の物理

熱と高温: 物質に外部から熱を加え温度を上げていくと、物質を構成する分子・原子の運動は活発になり、**固体は溶けて液体になり、液体は気体になる**。気体をさらに加熱すると、原子がばらばらに分解され**プラズマ**と呼ばれる状態になる

温度は物体の状態を示すもの

熱はエネルギーとして物体から出たり入ったりするもの

熱容量: 物体の温度を1℃上昇させるのに必要な熱量。

物体の量(質量)が2倍となれば、熱容量も2倍となる。単位はkJ/kg

比熱: 物質1kgの温度を1℃高める(あるいは下げる)のに必要な熱量。単位はkJ/kgK。水の比熱は4.18kJ/kgK

熱膨張: 物体の温度上昇に伴い体積が増加する現象。体積変化する割合を**体積膨張率**、線材など長さの変化する割合を**線膨張率**という。体積膨張率は線膨張率の3倍。単位は1/K

熱力学第一法則: ある閉じた系の中のエネルギーの総量は変化しない。「**エネルギー保存の法則**」ともいわれ、物理学でのもっとも基本的な法則の一つ

熱力学第二法則: エネルギーの移動の方向とエネルギーの質に関する法則で、様々な表現がある(Wikipedia)

オストワルトの原理 ーただ一つの熱源から熱を受け取って働き続ける熱機関(第二種永久機関)は実現不可能である

ジュール熱: 電気抵抗のある物体に電流を流して発生する熱。たとえば500Wの電熱器からは毎秒 $500(W) \div 4.2 = 119$ カロリーの熱を発生さる(数値4.2はワット→カロリーのエネルギー単位換算係数)

エンタルピー: 物質の発熱・吸熱挙動、及び、外部に対する仕事量にかかわる値(単位はKJ/Kg)を示す状態量。外部に熱を出すと**エンタルピーが下がり**、外部より熱を受け取ると**エンタルピーが上がる**。また、物質が他の物質などに仕事をする**とエンタルピーが下がり**、外部より仕事を受けると**エンタルピーが上がる**(Wikipedia)

関連団体:

(社)日本工業炉協会、 (財)次世代金属・複合材料研究開発協会 (株)超高温材料研究センター、
(社)日本鑄造協会(JFSinc)、 (社)日本鍛造協会、 (社)日本ダイカスト協会、 日本金属熱処理工業会、
(財)日本素形材センター、 日本鑄鍛鋼会、 (社)日本ボイラ協会、 日本陸用内燃機関協会

表42-1 各種金属の物性値 (20℃にて)

物質	密度 [g/cm ³]	比熱 [J/kgK]	熱伝導率 [W/mK]	線膨張率 [×10 ⁻⁶ /℃]	融点 [℃]
Al	2.7	900	204	23.9	660.2
Sn	7.29	226	64	23	231.9
Ti	4.54	528	17	8.5	1820
鑄鉄	7.28	461	48	10.5	1200
炭素鋼*1	7.83	461	53	12.18	—
10Cr鋼	7.79	461	31	10.19	1490
18-8SUS	7.82	502	16	16.7	1410
Cu*2	8.9	419	372	17.7	1083
Pb	11.34	130	35	29.3	327.4
Cr	7.1	419	66.9	6.2	1890
Co	8.8	431	70	12.3	1467

注) *1: 0.5C以下、*2: 普通商品の銅

熱 源

物体の温度を高めるために種々の手段が使われる。基本的には外部からエネルギーを与えて物体にそのエネルギーを熱として一時蓄え、所期の目的に利用する

種 類	熱 供 給 方 法	実 用 例	記 事
燃料	燃焼－空気等による酸化加熱	熱機関、溶鉱炉、製鋼、火力発電所（ボイラ）	固体燃料（石炭、木材）、液体燃料（石油製品）、気体燃料（天然ガス）など
電力	電気エネルギーにより水、金属等を加熱	電気温水器、電気炉、放電加工、電気溶接	抵抗線に電流を流して熱エネルギーに変換、放電加熱
自然エネルギー	太陽光の保有する熱、地殻の熱を利用	太陽熱温水器、太陽熱集光発電、地熱発電、温泉	自然界の熱の直接利用
原子力	原子核反応による発熱を利用、水、ナトリウム等を加熱	原子力発電、核融合炉	核分裂反応、核融合反応。太陽熱も源は核融合
摩擦熱	摩擦による発熱で金属等を加熱	摩擦溶接、FSW *1、マッチの点火	ブレーキでの摩擦熱には放熱が必要
電磁波	電磁波で物体の内部から加熱。高周波誘電加熱とマイクロ波加熱	高周波誘導炉、IHクッキングヒータ、電子レンジ	短時間加熱、均一加熱、高い熱効率、真空中加熱・梱包後加熱などが可能
化学変化	無機物の化学変化の反応熱を利用	使い捨て懐炉、発熱機能付食品	鉄の酸化熱（懐炉）、生石灰＋水（弁当、酒）
排熱利用	変電所、地下鉄、焼却炉、下水道などの排熱利用	地域暖房	省エネで今後の活用が期待される。利用できる温度が低いので用途に限られる

注） *1 FSW＝摩擦攪拌接合

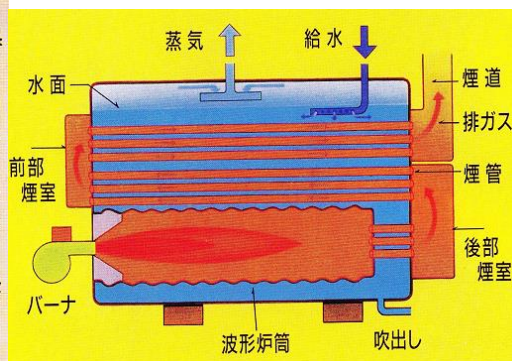
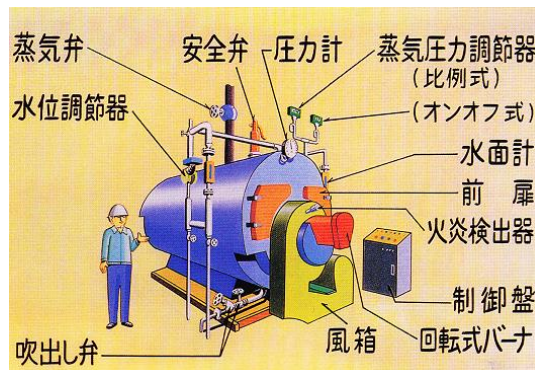


図42-3 炉筒煙管ボイラ（ボイラー図鑑）



図42-4 太陽光集光発電
(NREL/USA)

熱の伝わり

潜熱: 物質の相が変化するとき(融解、凝固、気化、液化など)に吸収または放熱される熱エネルギー

顕熱: 相変化がなく物質の温度上昇、低下に直接係わる熱エネルギー

熱の移動

熱伝導... 物質の中を熱が伝わる伝熱作用、熱の流れやすさを表すのに**熱伝導率 λ [W/(m.K)]**を使う

熱伝達... 固体表面から液体または気体(逆もあり)に熱が伝わる伝熱作用、**熱伝達率 α [W/(m².K)]**を使う

熱通過(熱貫流)... 固体を通して流体から流体に熱が伝わる作用、**熱通過率 K [W/(m².K)]**を使う

(熱伝達→熱伝導→熱伝達)

熱放射... ある物体から空間を隔てて、離れている物体に熱放射線(電磁波)によって熱が移動する

対流= 流体に温度や表面張力などが原因により不均質性が生じて、重力によって引き起こされる流動現象で、流動によって、熱も移動する。地球の0~11kmの大気においては、鉛直方向の流動現象があり、この領域を対流圏と呼ぶ。(Wikipedia)

遮熱= 温度差のある二つの流体を仕切っている壁の熱通過を防いでその温度差を保持すること。高温側からの放射熱を反射し、壁の材料と構造を選んで熱伝導を下げることで熱通過を低く保つ。気泡を含む材料(発泡スチロールなど)、真空層を含む多重層などが使われる。遮熱塗料、遮熱フィルム、遮熱カーテンなどもある。高温用としては遮熱タイル、遮熱コーティングも実用化

蓄熱(保温)= 熱を蓄えること。最大需要時に蓄えを利用することで、熱源設備の容量を縮小することができる。深夜電力利用の貯湯槽など、長所はピークカット運転、停電時対応、安価な深夜電力利用などが可能、短所は建設費、熱損失

表42-2 伝熱利用技術の例

機 器	原 理	内 容
熱交換器	熱通過、蓄熱	高温流体から低温流体へ管壁を通して熱を伝える。 蓄熱材に一時蓄熱するタイプもある
ボイラ	熱伝導、熱伝達	管内の水を管壁を通して外部から加熱
ヒートパイプ	対流	細管内の液体が下部から上部へ流れて熱を運ぶ
太陽熱温水器	熱放射、熱伝達	屋根上の水管内の水を太陽からの熱放射線で加熱
ラジエータ	熱伝達	エンジンからの高温冷却水をラジエータから放熱
保温ジャー	遮熱	ジャー複層壁が内部の高温物体からの放熱を防ぐ

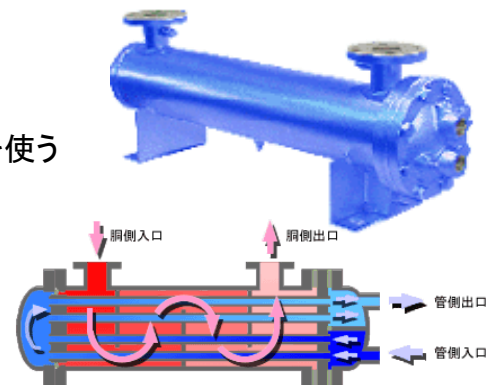


図42-5 シェルアンドチューブ式熱交換器 (神威産業)

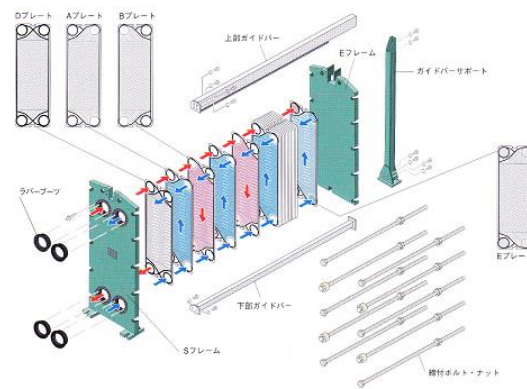


図42-6 プレートフィン式熱交換器 (日阪製作所)

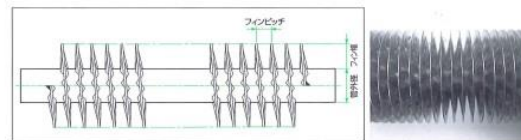


図42-7 フィンチューブ (勝川熱工)

耐熱材料

(JUTEM資料)

耐熱材料: 耐熱性、耐食性を高め、高温の装置に使用する材料。鋼に耐熱性を高める元素を添加、合金、特別な組織、セラミックス、これらの複合材料がある

耐熱鋼: 耐熱性、耐圧、耐酸化、耐酸、耐食、耐変形、強靱性、加工性を備えた合金鋼。Fe基にCr、Si、Mn、Ni、Coなどを添加、JIS規格ではSUS、SUHなど。
 具体的用途の例: **耐熱ボルト**、**燃焼器**、**重油バーナ**、**自動車用排ガス浄化装置**、**マフラー**、**吸気弁**、**排気弁**

超合金(超耐熱合金): Co基、Ni基の合金で、**ジェットエンジンの燃焼器**、**タービンの動翼・静翼**に適用。1000℃位まで耐用でき、高温強度と耐食性に優れる。遮熱皮膜(TBC)を施工して1500℃以上のガスにも耐える

超耐熱材料: Ni基超合金を超える耐熱性を備えた材料として、各種の金属間化合物、高融点金属の合金、セラミックス、セラミックマトリックス複合材料、C/C複合材料などの開発が進められている

金属間化合物: 種類は非常に多いが、代表的なものはTi-Al系、Ni-Al系。一般には硬くて加工は困難で、常温では脆いものが多い。Nb3Alは**航空・宇宙飛行体の構造用材料**として1800℃の高温まで利用できる可能性がある

高融点金属: W、Mo、Ta、Nbは耐火金属と総称され、高温まで安定な固体を保持。W合金は1760℃でも超合金1100℃なみの強度

セラミックス: 炭化珪素(SiC)、窒化珪素(Si3N4)は**ガスタービンなどの高温部材**に採用される

複合材料: マトリックスには金属基、セラミックス基(CMC)、炭素系(C/C)がある。金属系、Ti合金は1000℃以下で使用。セラミックス基は耐熱性、耐酸化性に優れるが、破壊靱性、耐熱衝撃性が低い

タービン翼の構造: 冷却翼として、1500℃級の高温ガスに曝される翼を内部から冷却して材料温度を1000℃以下に保持

耐熱塗装: 高温環境用として、セラミックコーティング、溶射、耐熱タイル貼り付け(**宇宙ロケット**等)

表42-3 超合金を超える高温用の期待される材料

	種 類	将来への具体例
金属系	金属間化合物	バルブシート、タペット
	高融点金属合金	核融合ブランケット
セラミックス系	酸化物系	絶縁部材、断熱部材
	非酸化物系	タービン高温部
複合材料	金属系	宇宙航空、原子炉
	傾斜機能材料	スペースプレーン外壁材

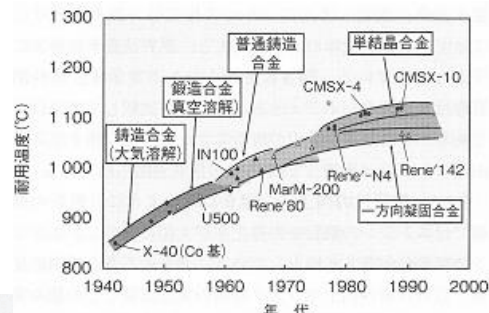


図42-8 タービン用翼材料の耐用温度 (JSME)

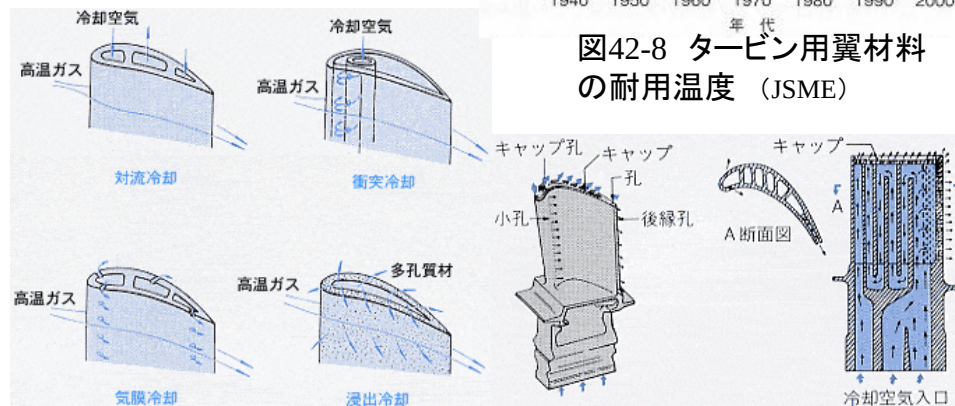


図42-9 空冷タービン翼の冷却方式(CF-6/JAL)

高温の金属工業

高温利用には熱による金属等の性状(硬さ)変化、相変化(溶融)、寸法変化(熱膨張)、殺菌などがある

金属 の 精錬	製鉄	高炉での鉄鉱石(Fe_2O_3)の還元による溶鉄製造。還元剤はコークス中のCとその酸化で発生したCOガスで、還元と同時に浸炭が起こり、約4%の炭素を含む溶融鉄鉄(溶鉄)が得られる
	製鋼	高炉で得られた鉄鉄を製鋼炉(転炉、電気炉など)での脱炭による溶鋼製造工程
	連続 casting	転炉から出た溶鋼を高温のまま連続してスラブ等の鋼材に casting する。現在日本の製鉄では98%以上がこの方法
	鑄鉄製造	鉄鉄、屑鉄等をコークスの燃焼熱(1600°C)を利用して溶鉄炉(キューポラなど)で溶かして鑄物の溶湯を得る
金属 の 成形	鑄造	溶鋼を砂や金属で作成した型に流し込み、そのまま冷やして目的の形状に固める成形方法
	鍛造	素材に圧力を加えることによって鍛錬すると共に目的の形状に成形する塑性加工法。日本伝統の刀鍛冶もその1つ
	熱間圧延	1000°C 以上に加熱し鋼材(スラブ)を、数段階のローラの間を通して2~3mmの厚さの板に加工。その後常温の冷間圧延で仕上げる
機械 部品 製造	焼き締め	軸と穴のある2つの金属部品を熱膨張(または収縮)を利用して強い接合を得る方法
	焼入れ、焼戻し	焼入れは $750\sim 800^\circ\text{C}$ に加熱した鋼を急冷して硬さを高める操作。鋼、ジュラルミン等に適用。焼入れ後、硬さ、ねばり強さ調整、内部応力除去のため焼戻しを行なう
	溶接	金属同士を高温にして接続する方法; 1.接合部近辺を溶かす融接(ガス溶接、電気溶接など)、2.圧力をかけて接着する圧接(スポット溶接など)、3.別の金属を溶かして接合するろう接(ハンダ接など)がある
	FSW	円筒状の工具を回転させながら部材(母材)に強い力で押し付けて摩擦熱を発生させて母材を軟化溶接する



図42-10 高温装置と応用
(千葉県立現代産業科学館)

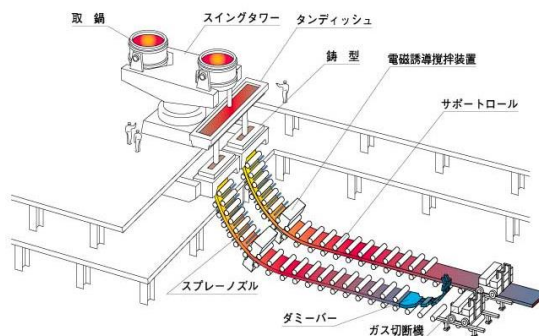


図42-11 連続 casting 法(川崎製鋼)

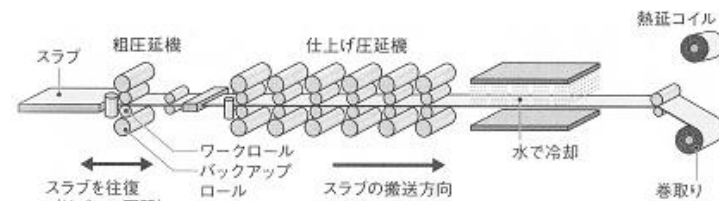


図42-12 熱間圧延 ④

工業炉

工業炉：鉄鋼、自動車、電気・電子、窯業、化学工業及び環境関連等の産業分野で加熱目的に利用され、溶解、精錬、加熱、各種熱処理、脱臭等の工程で使われる「炉」設備。工業用原材料と機能要素部品の製造工程に不可欠

表42-4 おもな工業炉の分類

(「工業炉の日本標準商品の分類」より抜粋)

種 類	加 熱 目 的	代表的な炉（赤い数値は炉内温度の例(℃)）
金属溶解炉	コークス燃焼、電気アーク、高周波誘導などで加熱して金属を溶解	溶鋇炉（高炉2200、溶鋇反射炉、電気製鋇炉）、鉄鋼溶解炉（キューポラ、平炉）、製鋼アーク炉1600、高周波誘導炉、真空溶解炉、製鋼転炉、非鉄金属るつぼ炉、
金属用均熱炉・加熱炉	高温加工処理部品の工程前加熱	鉄鋼均熱炉1600、非鉄金属均熱炉、金属用加熱炉（鉄鋼圧延加熱炉、非鉄金属圧延加熱炉、鉄鋼鍛造加熱炉）
金属用熱処理炉	焼入れ、焼戻し、析出硬化、焼なまし、溶体化、ろう付けなどを目的とした金属の熱処理	焼ならし炉、焼入炉1280、焼戻炉650、焼なまし炉、表面熱処理炉（浸炭炉、窒化炉）、表面処理炉（めっき炉）
金属用焼結炉・ばい焼炉	配合した粉末金属を圧縮成形し加熱焼結する（焼結炉）	粉末金属焼結炉2500、鋇石焼結炉、鋇石ばい焼炉
窯業用炉	セメント、陶磁器、煉瓦、ガラス等を焼成する炉	焼成炉（セメント1450、石灰、陶磁器、耐火物1800の各焼成）、溶解炉（ガラス溶解炉1400、ガラス熱処理炉）
化学工業用炉	改質、乾留「等化学工業で加熱	改質炉、乾留炉、加熱炉、焼却炉、コークス炉1300
乾燥炉	加熱処理部品の工程中乾燥	鋳型乾燥炉、中子乾燥炉、焼付乾燥炉、窯業用乾燥炉

均熱炉＝製鋼工場から出たインゴットを圧延工程のために規定温度に加熱

ばい焼炉＝精錬に際して、
硫化鉱石を焙焼して酸化
鉱物とするために用いる炉

乾留＝不揮発性固形物を
空気を断ったまま強熱し、
自然発火を抑えながら熱分
解により揮発性物質と不揮
発性物質に分ける

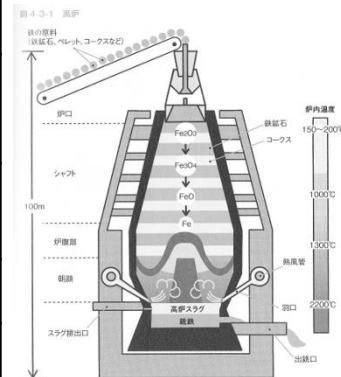


图42-13 高炉 ④

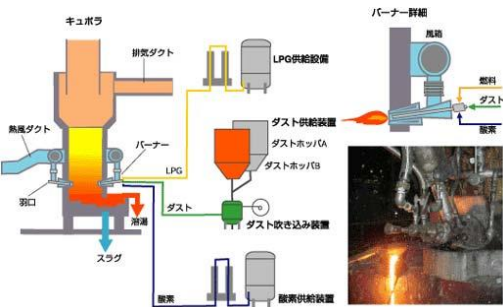


図42-14 キュポラ(コマツ)

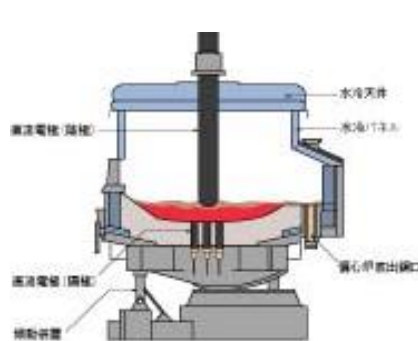


図42-15 直流アーク炉(川崎製鋼)

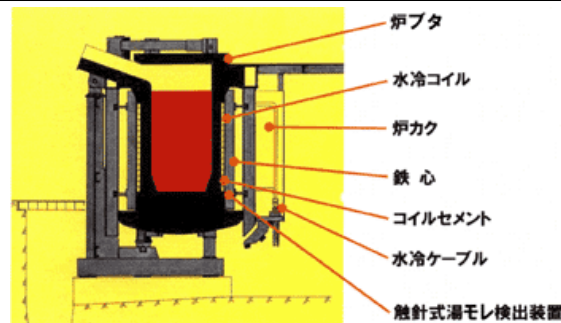


図42-16 るつぼ型高周波誘導炉
(タイチク)



図42-17 熱処理炉
(中日本工業炉)

熱機関

原動機／エンジン：高温の熱エネルギーを変換して動力を発生させる機械設備。利用される熱エネルギー源は燃料（化学エネルギー）、太陽熱、地熱、核エネルギー。内燃機関と外燃機関に区別される

表42-5 エンジンの温度と用途

	エンジン	燃 料	最高温度	主な用途
内 燃 機 関	ガスエンジン	天然ガス、LNG		小型発電
	ガソリンエンジン	ガソリン	2500℃	自動車、農機、小型船舶
	ディーゼルエンジン	軽油、灯油	2500℃	自動車、建機、発電、船舶
	ガスタービン	軽油、LNG	1500℃ * 1	発電、ヘリコプター、艦艇
	ジェットエンジン・ターボファン	航空用ケロシン	1600℃ * 2	航空機
	ロケットエンジン	液体水素、固形燃料	3000℃	宇宙ロケット、ミサイル
外 燃 機 関	蒸気タービンプラント	LNG、石炭、バイオ燃料、地熱、太陽熱	600℃	大型発電、LNG船
	スターリングエンジン	多様な燃料	900℃	実用化に向けて研究段階
	原子カプラント	核分裂、核融合	1800℃ * 3	大型発電、潜水艦
旧タイプのエンジンー 焼玉機関、フリーピストン機関、蒸気機関				漁船、機関車、工場
対象外ー 水力発電、風力発電の動力装置（熱機関ではない）				

* 1: MHI J型
* 2: 離陸時はさらに高温
* 3: 蒸気タービン入り口温度は284℃



図42-18 循環流動層ボイラ (JFE)

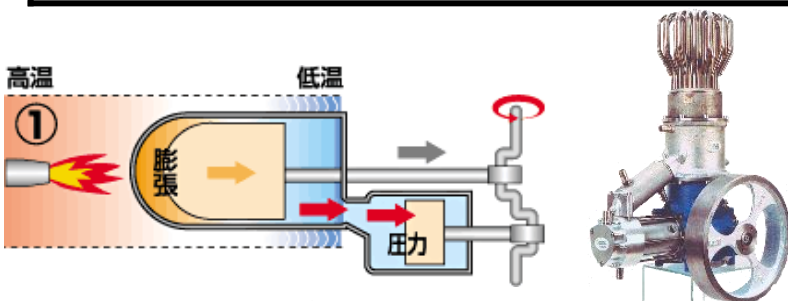


図42-19 スターリングエンジン (プロマテリアル)

図42-20 スターリングエンジン外形 (EPAS)



図42-21 ガスエンジン (JFE)

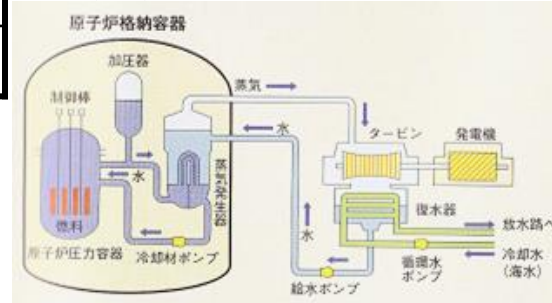


図42-22 加圧水型軽水炉原子カプラント (中国電力)

熱のカスケード利用

熱エネルギーを高温レベルの利用から低温レベルの利用へと、多段階(カスケード)に活用すること。これにより、資源の利用効率が向上する

たとえば石油やガスなどを燃焼させたエネルギーで発電し、その排熱を冷暖房に利用し、さらにより低温のその排熱で給湯する。従来の発電では、約30%のエネルギーが電力に利用されて残りは大気、水中に捨てられていたが、発電と併せて排熱を利用するコージェネレーションシステムでは、エネルギーの利用効率が70~80%になる

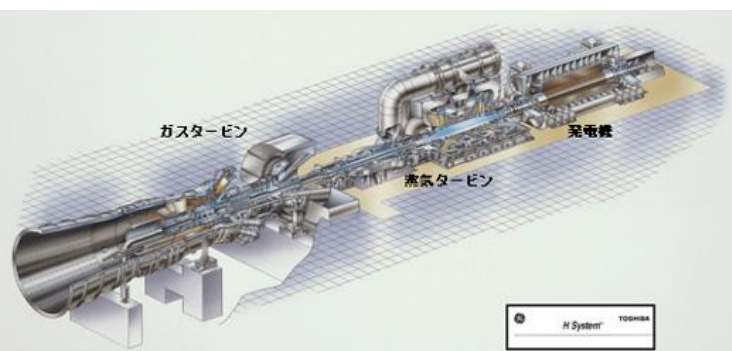
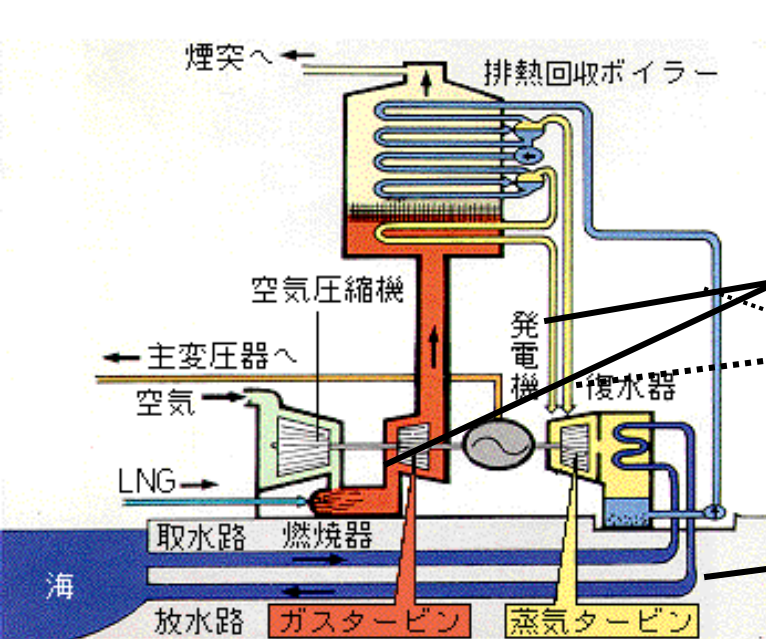


図42-24 コンバインドサイクル発電プラント
(上/電気事業連合会、下/東芝)

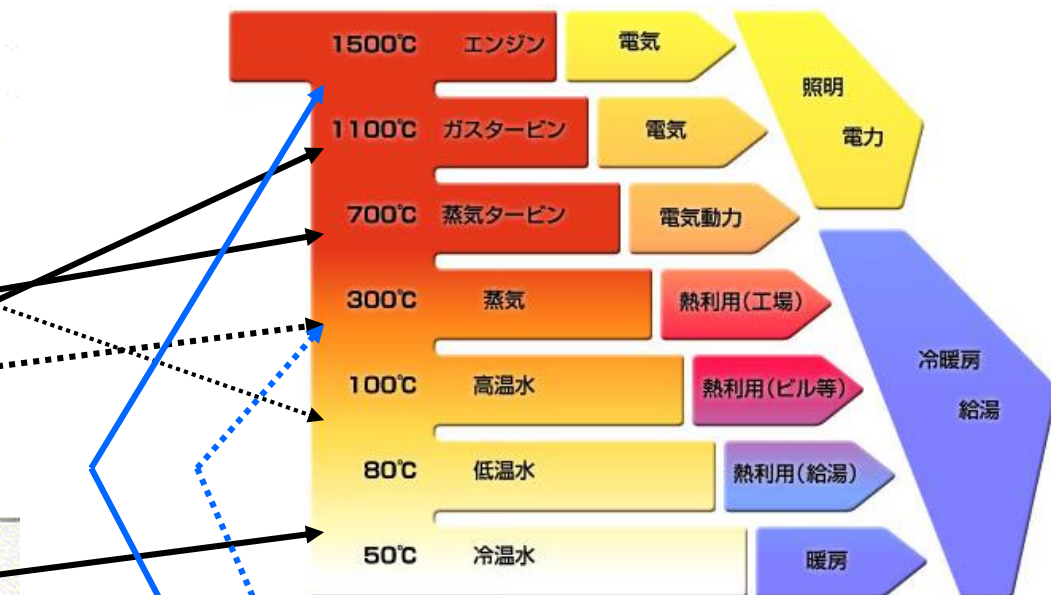


図42-23 熱のカスケード利用(三菱電機)



図42-25 ガスコージェネレーションシステム (東京ガス)

注)

コージェネレーション=発電と排熱利用

コンバインドサイクル=ガスタービン、燃料電池と蒸気タービン発電併用

蒸留・分留

蒸留 (Distillation) = 混合物を一度蒸発させ、後で再び凝縮させることで、沸点の異なる成分を分離・濃縮する操作。生成物として蒸留水、蒸留酒などがある。共沸しない混合物であれば、蒸留によりほぼ完全に単離・精製することが可能であり、この操作を特に**分留**という。蒸留により成分を生成する操作は**精留** (rectification) と呼ばれる。石油精製のための精留を特に**分留** (fractional distillation) と呼ぶ

減圧蒸留 = 石油精製では特定の油種だけを生産することができない「連産品」である冬場の灯油需要の拡大という消費の変化に対応するため減圧下で蒸留して減圧軽油と減圧残渣油に分ける

焼酎の蒸留過程で大気圧 (常圧) ではもろみは90~100℃で沸騰するが、蒸留器の気圧を下げると40~60℃で沸騰する (米、麦焼酎ではよく使われる)。くせがなくマイルドに仕上がる

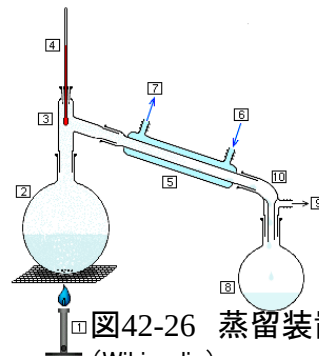


図42-26 蒸留装置の模式図
(Wikipedia)



図42-28 常圧蒸留装置 (出光)

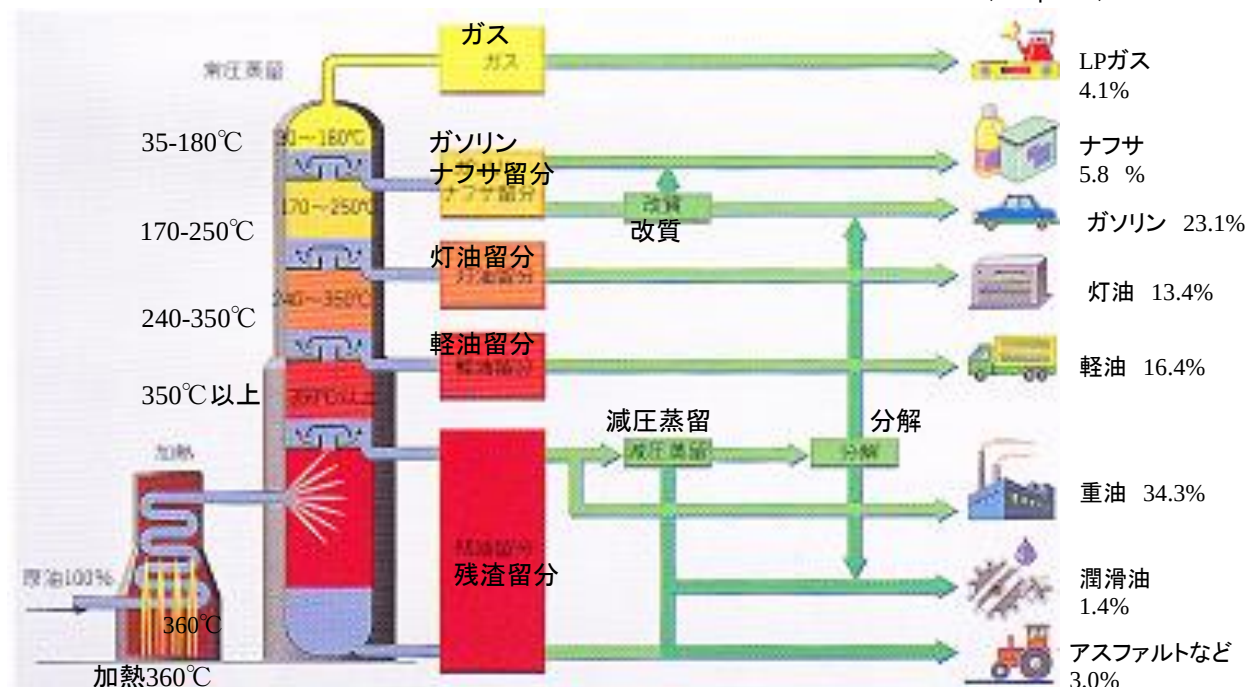


図42-27 石油の常圧蒸留
(千葉県立現代産業科学館)



図42-29 減圧蒸留装置
(Wikipedia)

課 題

熱処理の課題	経済産業省、素形材センターが2008年11月に熱処理技術ロードマップを発表。現状の課題として、1.燃費改善、軽量化、低騒音化、低歪化、2.金型の高寿命化、3.エネルギー利用の削減化、4.省人化、無人化、5.コスト低減、時間短縮化を挙げる
CO ₂ の削減	2050年80%削減のためのビジョンが2009年8月環境大臣より発表。産業分野では水素還元製鉄、内部熱交換型蒸留塔、高効率ボイラ、高効率モータ、石炭・石油から天然ガスへの転換などが挙げられている
超高温材料の開発	地球温暖化対策の一環として発電用タービン、原子力の高温化は必須であり、それに耐える超高温材料の開発、実用化(信頼性確保)の研究は構造設計と合わせて重要な課題である
工業炉業界ビジョン	大手中心に開発された高性能工業炉を業界の多くを占める中小企業群にも広く普及させるため、低コストで導入可能な小型高性能工業炉の開発が必要

キーワード

焼ならし、焼なまし	いずれも目的は「鋼の内部応力の除去」「鋼の結晶粒を小さくする」「鋼の材質改善」「組成加工で生じた繊維組織の解消」など。焼ならしは加熱炉から出した後、空冷する。焼きなましは炉中で徐々に冷やし冷却速度を操作する
クリープ強度 (Creep)	高温で金属の強さを表す重要な性質で、一定温度で規定の負荷をかけた時に耐えられる強度をいう。例えば1,000時間に1%とか0.1%の歪みを生じる応力で、単位はN/mm ² (kgf/mm ²)
点火、引火、発火、着火	英語はいずれも“Ignition”。 点火 は人為的操作で火をつけること。 引火 は火種を燃料の側まで近づけて火がつく現象。 発火 は自然発生的な現象として火がつくこと。 着火 は火をつける意味の一般的用語(安全工学研究室)。 引火点 は可燃性の液体物質が空気と可燃性の混合物を作ることのできる最低温度。 着火温度 は可燃物質を規定条件で加熱したとき炎や火花なしで自然に発火する最低の温度
プラズマ	通常的气体分子が電離し、正と負の電荷をもつ電子に別れて自由に飛び回っている、全体として電氣的に中性な物質。高温プラズマ(熱プラズマ)と、低温プラズマ(電子温度のみが高い)があり、高温(数万度)の熱プラズマは地球上のあらゆる物質を溶かしてしまうため、高融点の材料の開発が求められている。核融合、プラズマディスプレイ、溶接、プラズマロケット、カーボンナノチューブ、新素材の生成技術など、その応用分野は広い