

# 熱と温度のお話

(配布資料)

1. 国産初の水銀体温計を作った防府の柏木幸助
2. 温度と熱の伝わり方
3. 熱伝導と熱伝導率
4. 対流熱伝達
5. 原子力発電と伝熱

2015年7月23日 AYSA西部部会 シニアセミナー  
担当 MYM

# 「防府のエジソン 柏木幸助展」 防府市青少年科学館 ソラール より (2014年3月27日 朝日新聞)

## 「防府のエジソン」 体温計に見る偉業

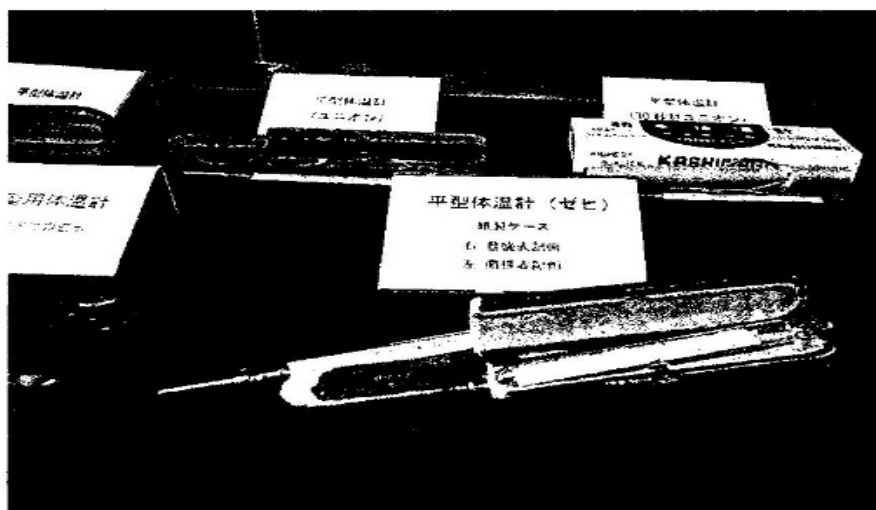
明治時代に国内産初の体温計の製造を始めた発明家、柏木幸助（1856～1923）の業績を紹介する企画展が、出身地の防府市で開かれている。安全マッチの製造も手がけ、地元では「防府のエジソン」とも言われている人物だ。

主催する市青少年科学館ソラールで、入場無料。

によると、柏木は江戸末期に薬屋の次男として生まれた。水銀製体温計の製造を始めたのは1883（明治16）年。当時の外国製の体温計は、体から離すと目盛りが下がる欠点があったが、柏木は一度計った目盛りは変化しない体温計を完成させた。値段も外国製より安かったため、大正時代には輸出するまでに事業は拡大。体温計の生産は長男が引き継ぎ、1959年まで続いた。

柏木は19歳の時には、擦らないと火が付かない安全マッチを開発した。当時、マッチは高価な輸入品で、少しの衝撃でも発火する危険物だった。

JR防府駅前のアスピラートで開かれている企画展では、柏木が生産した戦前の体温計も数点展示され、初期のモデルは写真パネルで紹介されている。功績をマンガ仕立てにしたパネルも展示。会期は31日まで



柏木が開発・製造した体温計＝防府市のアスピラート

## 国産初、海外輸出も 柏木幸助企画展



柏木幸助（ソラール提供）

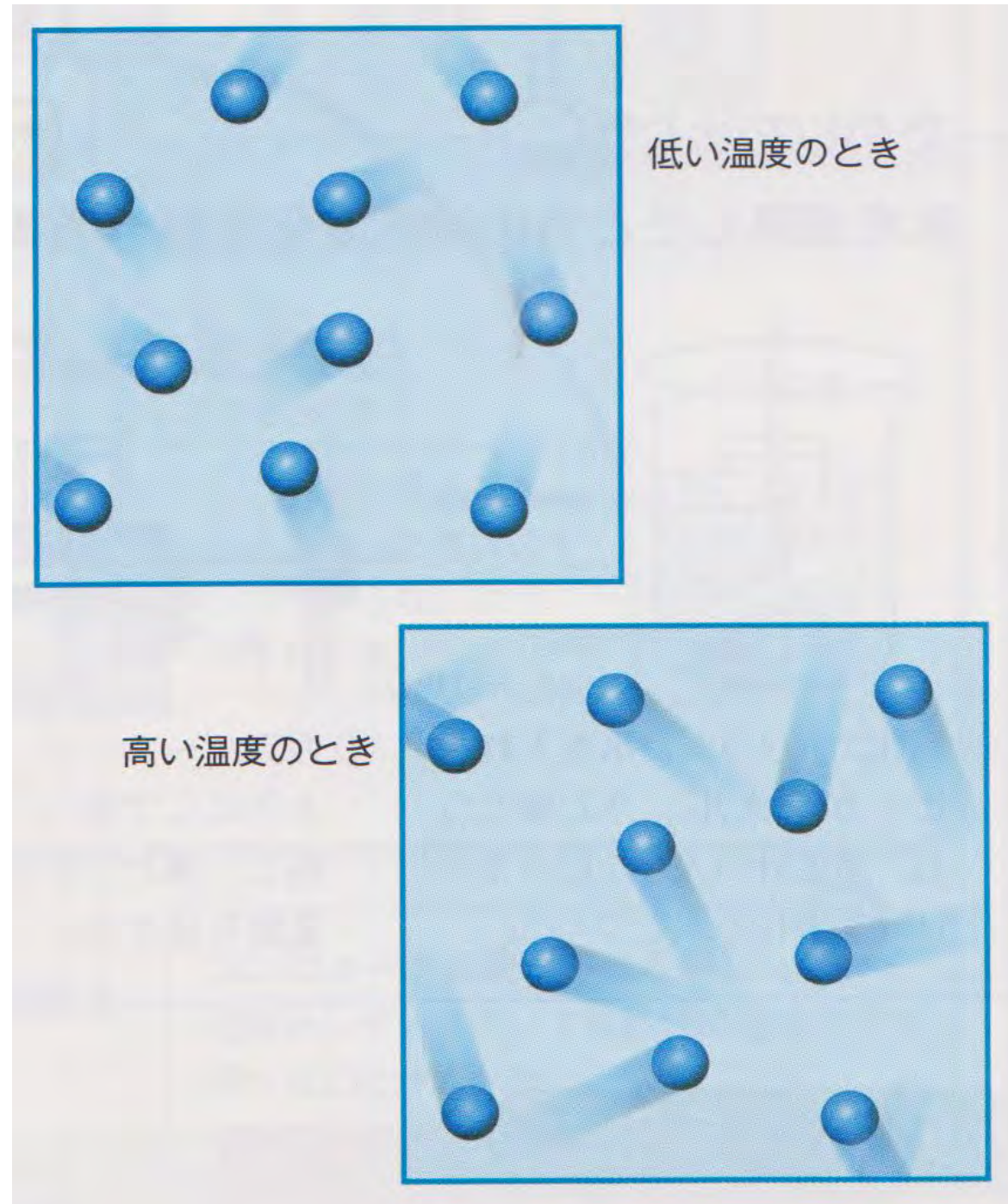
# ■ 温度と熱の伝わり方

## ◇ 中学生の理科の教科書 サイエンス 1

### 図47 熱と温度

物質に熱を加えると、物質をつくる粒子の運動はしだいに激しくなり、物質の温度は高くなる。

物質の温度はその物質をつくる粒子の運動の激しさのめやすを表している。

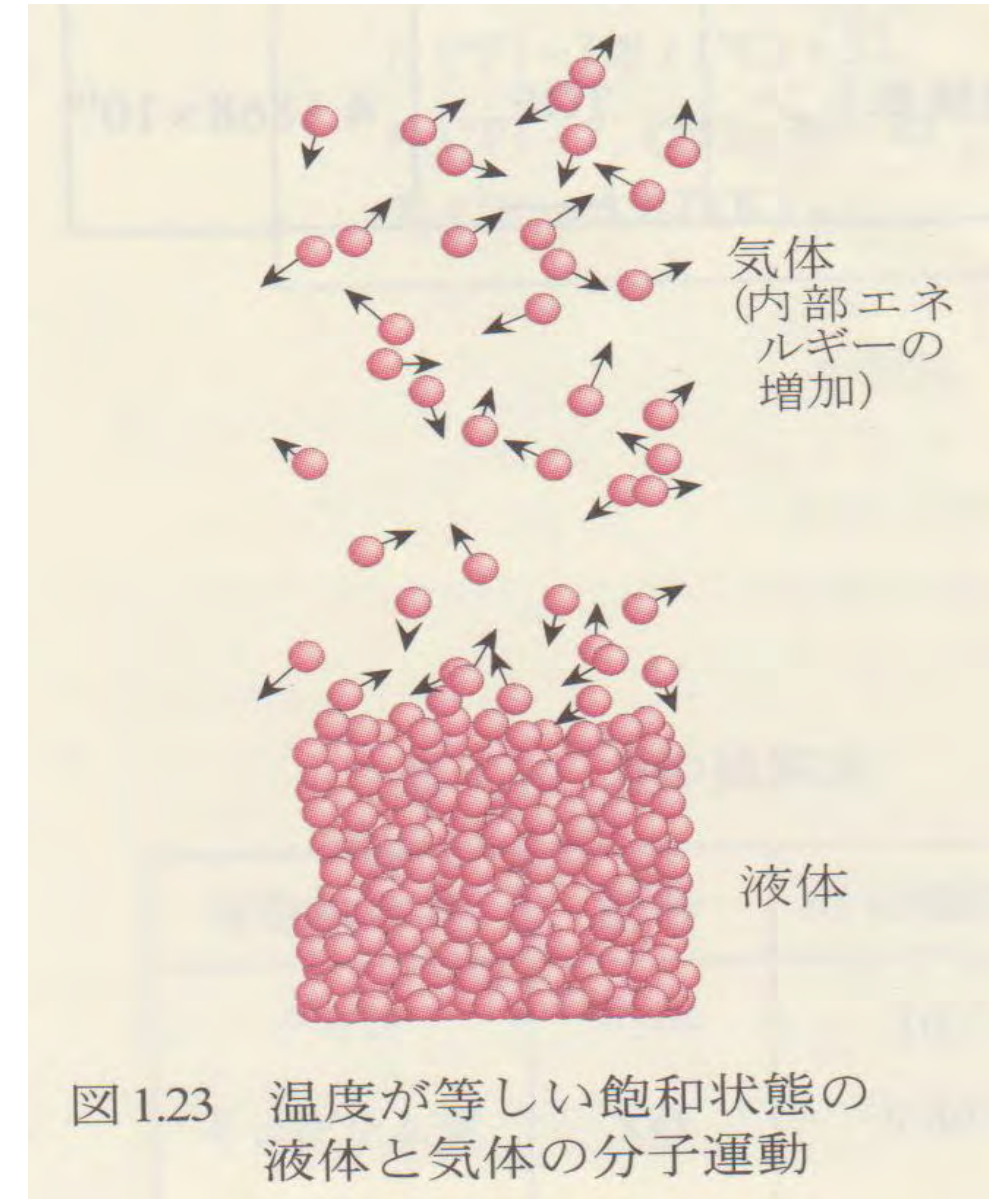




◇「基礎物理学」原康夫著（工学部1年生の物理学の教科書）より、

すべての物質は分子から構成されており、物質の中で分子は熱運動と呼ばれる乱雑な運動を行っている。物体の温度とは、その物体を構成している分子の1個あたりの熱運動の運動エネルギーの平均値の大小と結びついた物理量である。・ ・ ・

熱学では、物質を構成する分子の熱運動の運動エネルギーと分子間力の位置エネルギーの総和をその物体の内部エネルギーという。そして、高温の物体から低温の物体あるいは高温の部分から低温の部分に分子運動のエネルギーという形でエネルギーが移動するとき、この移動するエネルギーを熱と呼ぶ。



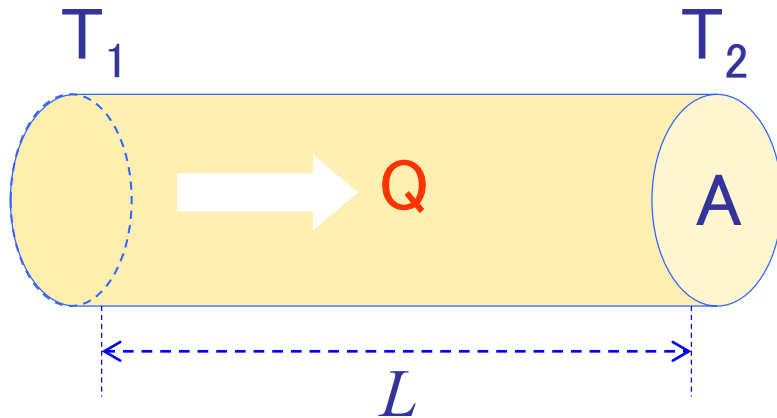
## ■ 熱伝導 (heat conduction)

### ◇ 熱伝導における基本法則：フーリエの法則

時間的に温度分布が変化しない定常状態を考える。

断面積  $A$ 、長さ  $L$  の棒の両端が、それぞれ、一様な温度  $T_1, T_2$  に保たれているとき、この棒を熱伝導によって単位時間に伝わる熱量、 $Q$  は、次のフーリエの法則により与えられる。

ただし、棒の側面は断熱されている。



$$Q = k A \frac{T_1 - T_2}{L} \quad \left[ \frac{J}{s} \right] = [W] \quad (1.1)$$

熱伝導により伝わる熱量は、棒の断面積と温度勾配に比例し、比例定数  $k$  を熱伝導率という。

表 2.1 各種物質の常温常圧における熱伝導率<sup>(1)</sup>

物 質 [常温(300 K), 常圧(101.3kPa)]		熱伝導率 $k$ (W/(m·K))
気体	水素	0.181
	ヘリウム	0.153
	メタン	0.034
	空気	0.026
	二酸化炭素	0.017
液体	水銀	8.52
	水	0.610
	アンモニア	0.479
	エチレングリコール	0.258
	メタノール	0.208
	潤滑油	0.086
固体 (純金属)	銀	427
	銅	398
	金	315
	アルミニウム	237
	マグネシウム	156
	ニッケル	90.5
	鉄	80.3
	白金	71.4
	鉛	35.2
	チタン	21.9

## △ 熱伝導率について

熱の伝わりやすさを表す物性値である。

「伝熱工学」 p.8 表2.1

各物質の常温常圧における熱伝導率

固体 (合金)	黄銅 (Cu-40Zn)	123
	はんだ	46.5
	炭素綱 (S35C)	43.0
	ステンレス鋼(SUS304)	16.0
	チタン合金(Ti-6Al-4V)	7.60
固体 (非金属)	サファイア	46.0
	氷 (273K)	2.20
	石英ガラス	1.38
	ソーダガラス	1.03
	アクリル樹脂	0.21

ダイヤモンド: 900~2300 W/(mK)

シリカエアロゲル: 0.014~0.02 W/(mK)





図 5.7 軽く、断熱性の高いシリカエアロゲル。バーナーの炎で飛ばされないように手で押さえている。

## ◇ シリカエアロゲル

熱伝導率  $0.014 \sim 0.021 \text{ W/mK}$   
(空気の熱伝導率  $0.026$  より小さい。)

体積の95%が空気、ナノサイズの多孔性を有するシリカ構造体です。  
耐熱温度 $650^{\circ}\text{C}$ 、非常に軽い。

気体の熱伝導率  $\sim$  音速  $\sim \sqrt{\text{温度} [\text{K}]}$

気体の熱伝導率の圧力依存性は非常に小さい。



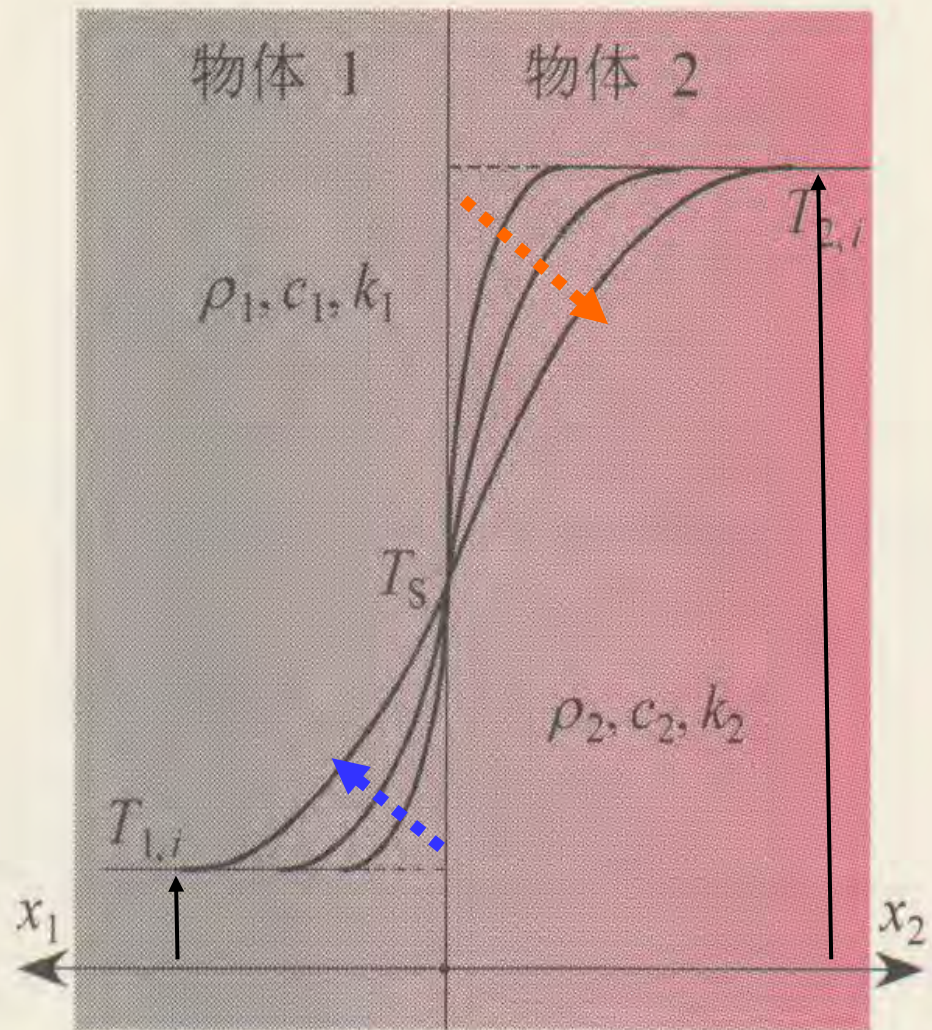


図 2.30 2つの半無限物体が接した場合の過渡温度分布

## ■ 温度の異なる2つの半無限物体の接触

図に示すように、初期温度がそれぞれ  $T_{1i}$ 、 $T_{2i}$  の2つの半無限物体を接触させた場合の非定常熱伝導問題を考える。二つの物体が完全に接触し、接触熱抵抗は無視できるとする。 $\rho$  = 密度、 $c$  = 比熱、 $k$  = 熱伝導率

接触面の温度  $T_s$  は、次式で与えられ、時間  $t$  に依存しない一定値になる。

$$T_s = \frac{\sqrt{\rho_1 c_1 k_1} T_{1i} + \sqrt{\rho_2 c_2 k_2} T_{2i}}{\sqrt{\rho_1 c_1 k_1} + \sqrt{\rho_2 c_2 k_2}}$$

ここに  $\sqrt{\rho c k}$  = 熱慣性 という



◇ 熱関連の物性値(常圧・常温近傍)  $\alpha = \frac{k}{\rho c}$   $\beta = \sqrt{\rho c k}$

物質名 ↓ 単位 →	密度 $\rho$ kg/m <sup>3</sup>	比熱 C kJ/(kgK)	熱伝導率 k W/(mK)	温度伝導率 $\alpha$ 10 <sup>-5</sup> × m <sup>2</sup> /s	熱慣性 $\beta$ J/(m <sup>2</sup> Ks <sup>1/2</sup> )
空気	1.1763	1.007	0.0262	2.22	5.56
水	996.62	4.179	0.615	0.0148	1600
花崗岩	2650	1.1	4.3	0.15	3540
中炭素鋼	7850	0.465	51.5	1.39	13700
銅	8880	0.386	398	11.7	36900
ダイヤモンド	3615	0.5125	900～2300	12.8～134	40834～65278
ガラス	2520	0.8	1.03	0.047	1441
杉材	300	1.3	0.069	0.018	164
人の皮膚	1050	3.6	0.45	0.0119	1304
紙	900	1.3	0.06	0.53	250
羊毛布地	380	1.4	0.04	0.008	146

■ 同じ温度100℃でも、サウナには入れるが、熱湯では火傷をする。  
なぜだろうか？



サウナ風呂  
温度100℃



熱湯  
温度100℃



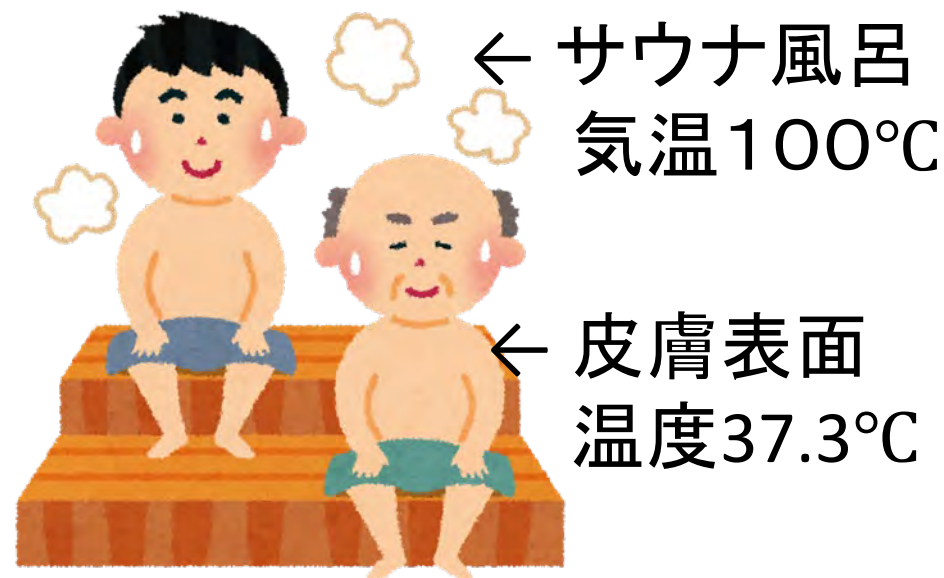
◇ 温度100℃のサウナに入った直後と、100℃のお湯に入った直後の皮膚の表面温度を、熱慣性の式から計算すると(皮膚の初期温度を37℃とする。)

$$T_s = \frac{\sqrt{\rho_1 c_1 k_1} T_{1i} + \sqrt{\rho_2 c_2 k_2} T_{2i}}{\sqrt{\rho_1 c_1 k_1} + \sqrt{\rho_2 c_2 k_2}}$$

$$T_s = \frac{\sqrt{\rho_1 c_1 k_1} T_{1i} + \sqrt{\rho_2 c_2 k_2} T_{2i}}{\sqrt{\rho_1 c_1 k_1} + \sqrt{\rho_2 c_2 k_2}}$$

熱慣性 (  $\beta = \sqrt{\rho c k}$  ) の値 (J/(m<sup>2</sup>Ks<sup>1/2</sup>)) は、空気=5.56、水=1600、皮膚=1304

◇ サウナとお湯に入った直後の皮膚表面温度はそれぞれ **37.3°C**、**72.2°C** となる。したがって、サウナの場合には火傷をしないが、お湯に入った場合の皮膚表面温度は細胞が壊死する温度となるので火傷を負うことになる。



◇ 体温より温度が低い金属に触れたときには冷たく感じるが、低温の木や断熱材に触ってもさほど冷たく感じないのもこの理由による。



# ■「人は常に発熱している」 (基礎代謝と消費カロリー)

人が生命を維持するのに1日当たり必要な最小限のエネルギー消費量を基礎代謝という。20歳男子の平均値は1600kcal(女子は1350kcal)、基礎代謝のうち約1/3が心臓の活動や呼吸、体温維持などに使われ、2/3が筋肉などの活動によって消費される、とされている。

75歳男性では基礎代謝は1260 kcal程度である。

2010年12月25日 朝日 →

メッツの値: 安静時=1、普通の歩行=3、  
ジョギング・サッカー=7、階段を上がる=8、  
水泳(平泳ぎ)=10

## カロリーとは (cal)

1気圧のもと1gの水を1℃上げるのに必要な熱量(ラテン語で「熱」の意味)

$$1000\text{cal} = 1\text{Cal} = 1\text{kcal}$$



## 消費カロリー (kcal)

$$= 1.05 \times \text{体重} \times \text{強度} \times \text{運動時間}$$

(kg) (メッツ) (時)

60kgの人が5分間階段を上がると...

$$1.05 \times 60 \times 8 \times \frac{5}{60} = 42\text{kcal}$$

## 1日の推定カロリー必要量(kcal)

身体活動レベル	男			女		
	低い	ふつう	高い	低い	ふつう	高い
15歳～17歳	2450	2750	3100	2000	2250	2500
18歳～29歳	2250	2650	3000	1700	1950	2250
30歳～49歳	2300	2650	3050	1750	2000	2300
50歳～69歳	2100	2450	2800	1650	1950	2200
70歳以上	1850	2200	2500	1450	1700	2000

「日本人の食事摂取基準(2010年版)」から

基礎代謝による発熱量の平均値は(1 kcalは 4.18605 kJ )であるから、基礎代謝 1600 kcal の場合は

$$\frac{1600 \times 4.186 \times 1000}{24 \times 60 \times 60} = 77.519 \frac{J}{s} = 77.5 W$$

1260 kcal の場合は 61.04 W  $\doteq$  61 W

人体の表面積は次式で計算できる(ネットのサイトより)。

人体の表面積(m<sup>2</sup>)

$$= \text{体重(kg)}^{0.425} \times \text{身長(cm)}^{0.725} \times 0.007184$$

宮本の体表面積を計算すると 1.66 m<sup>2</sup> したがって、

基礎代謝による平均熱流束は 約 37 W/m<sup>2</sup> となる。

体温を保つため常に人体表面からは放熱されている。

放熱

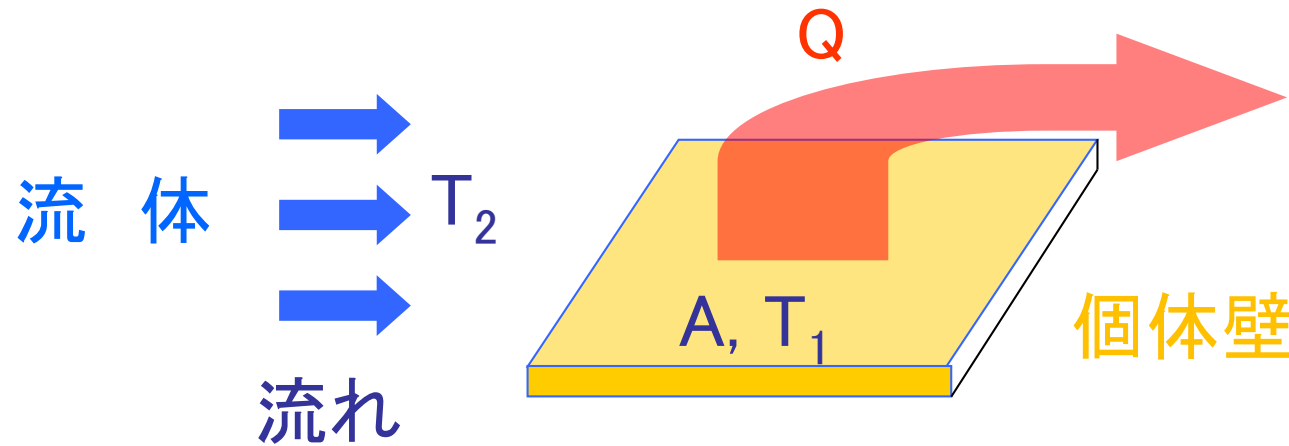


メッツの値: 安静時=1、普通の歩行=3、ジョギング・サッカー=7、階段を上がる=8、水泳(平泳ぎ)=10

## ■ 対流熱伝達 (convective heat transfer)

(ニュートンの冷却法則とも言われる)

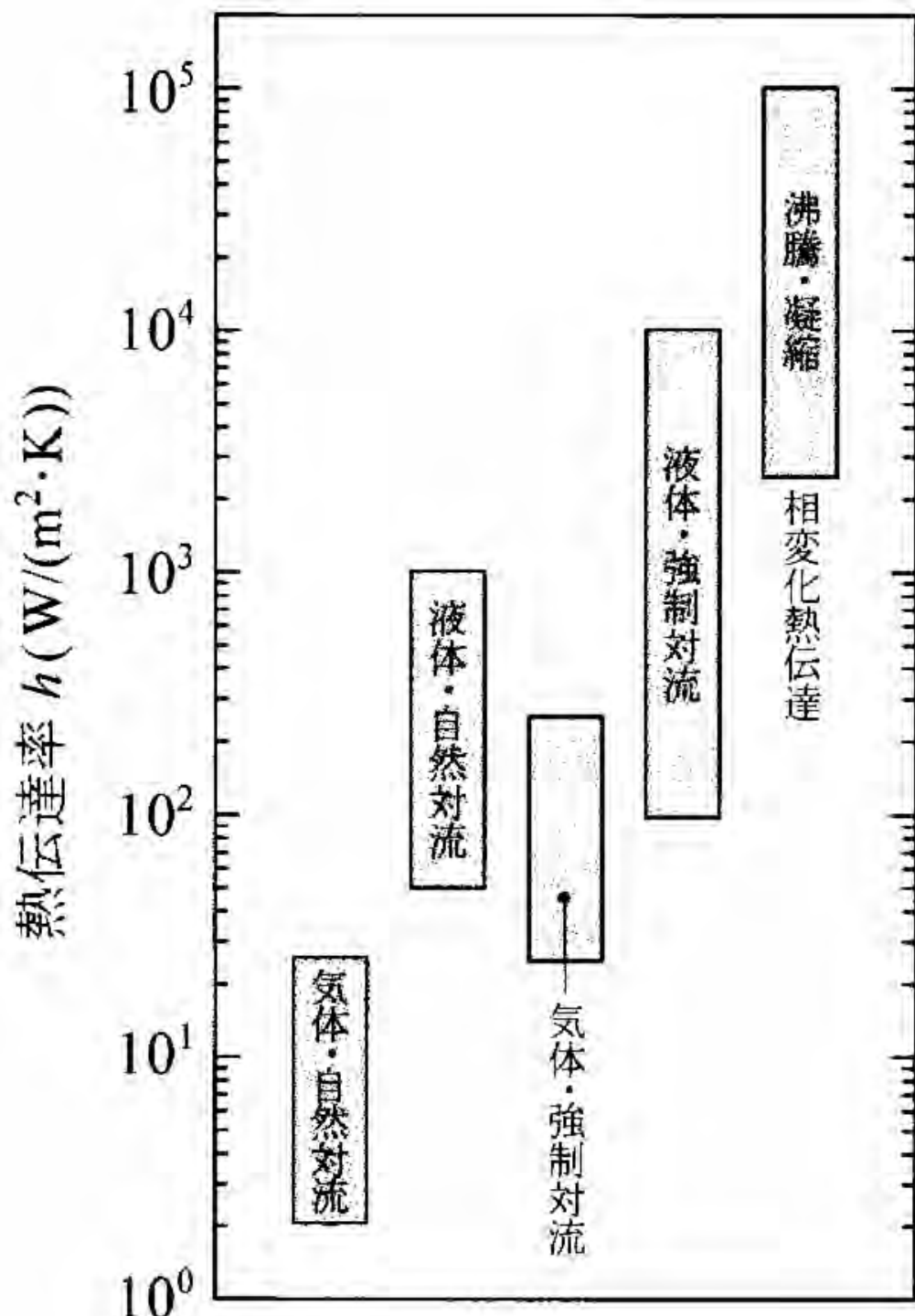
温度  $T_1$  表面積  $A$  の物体のまわりに温度  $T_2$  の流体が流れているときに、物体の表面から単位時間当たり、流体に伝えられる熱量は、次の様に熱伝達率  $h$  (heat transfer coefficient) を用いて表される。


$$Q = Ah(T_1 - T_2) \quad [W] \quad (1.4)$$

固体表面から流体に伝えられる熱は、**流体と固体表面との温度差と表面積**に比例する。

比例定数  $h$  は**熱伝達率**と呼ばれ流速や流体の種類などにより変化する。





■ 図1.19 熱伝達率のおおよその大きさ

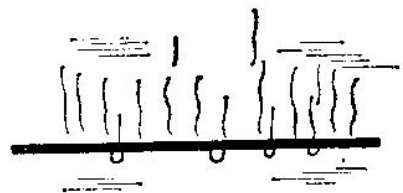
$$Q = Ah(T_1 - T_2) \quad [W]$$

$$[h] = \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$$

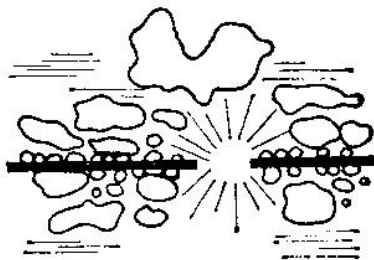
$$\text{熱流束 } q = \frac{Q}{A} \quad \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

◇ 相変化を伴う場合、熱伝達率が非常に大きい。沸騰熱伝達には限界熱流束  $q_c$  が存在する。大気圧下の水では  $q_c \simeq 1100 \text{ kW/m}^2$  (超えるとバーンアウト burnout が発生する)

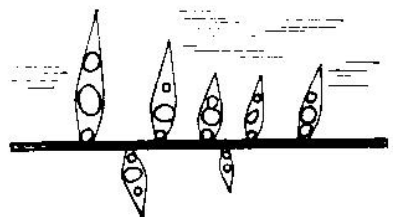
◇ コンピュータチップやLEDでは、発熱量はそれ程大きくないが、寸法が小さいため、放熱の熱流束  $q=Q/A \text{ W/m}^2$  は非常に大きくなる。



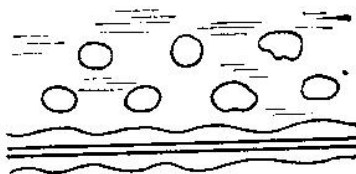
(a) 自然対流(非沸騰)



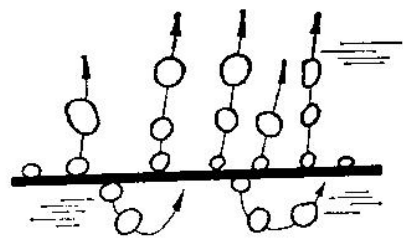
(e) バーンアウト



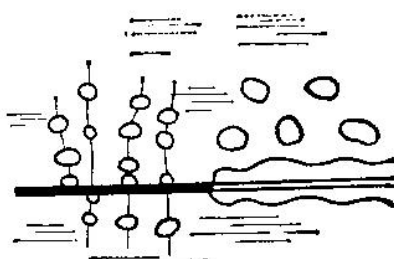
(b) サブクール沸騰



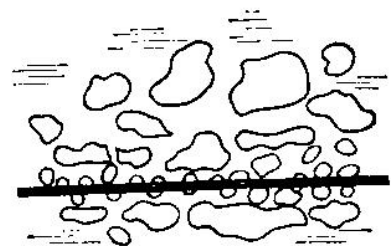
(f) 膜沸騰



(c) 核沸騰(低・中負荷)



(g) 核・膜共存



(d) 核沸騰(高負荷)

← ◇ 電熱線上のプール沸騰状況の変化  
のスケッチ

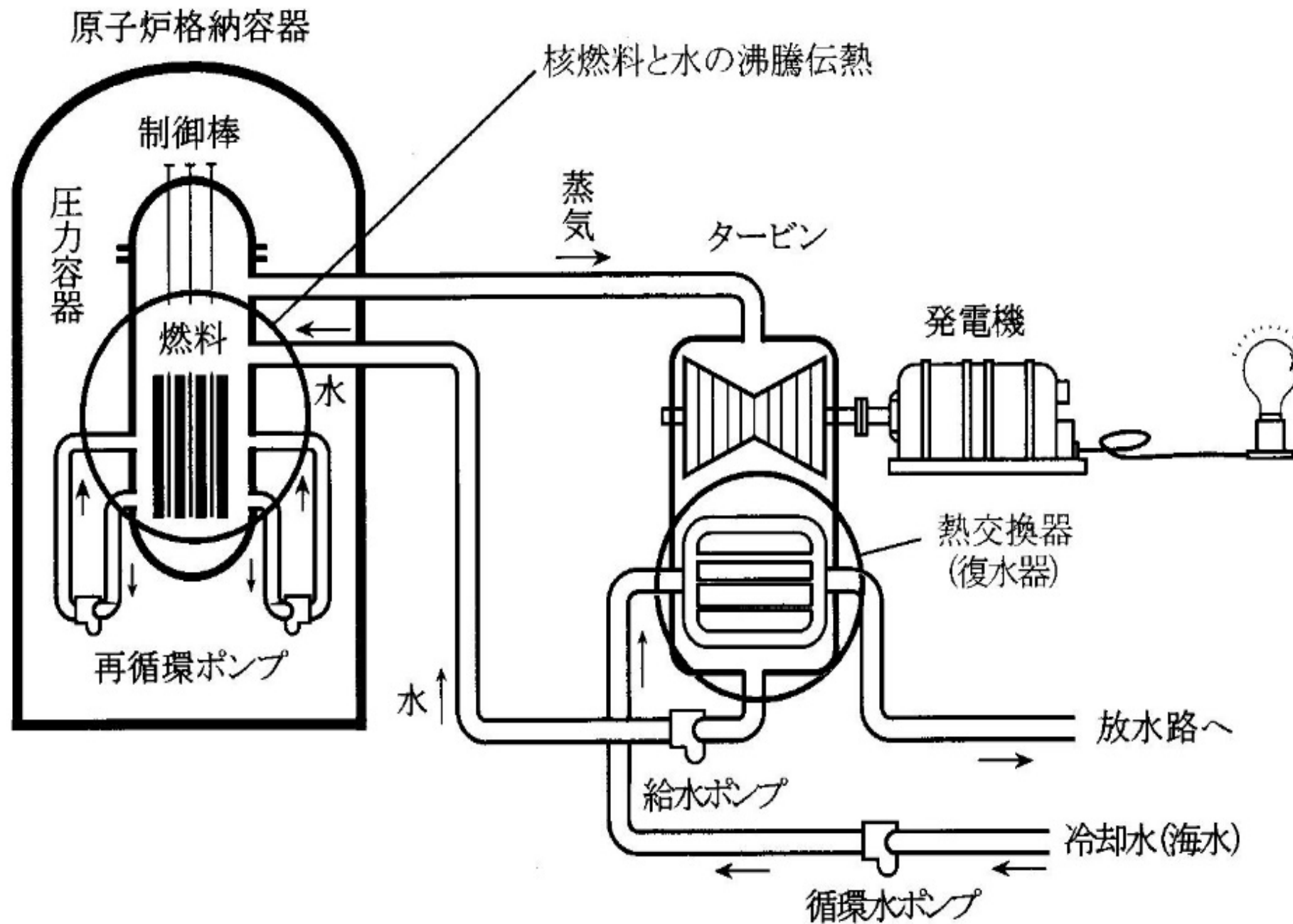
「伝熱工学」 一色・北山  
森北出版 1971年

◇ 沸騰特性曲線と沸騰の様相  
「伝熱工学」 日本機械学会編著  
次のページ

# 原子力発電と伝熱

## 沸騰水型原子炉の 概念図(BWR)

「伝熱工学」  
日本機械学会編著





■ 東京電力 福島第1原子力発電所

東北地方地震  
2011年3月11日

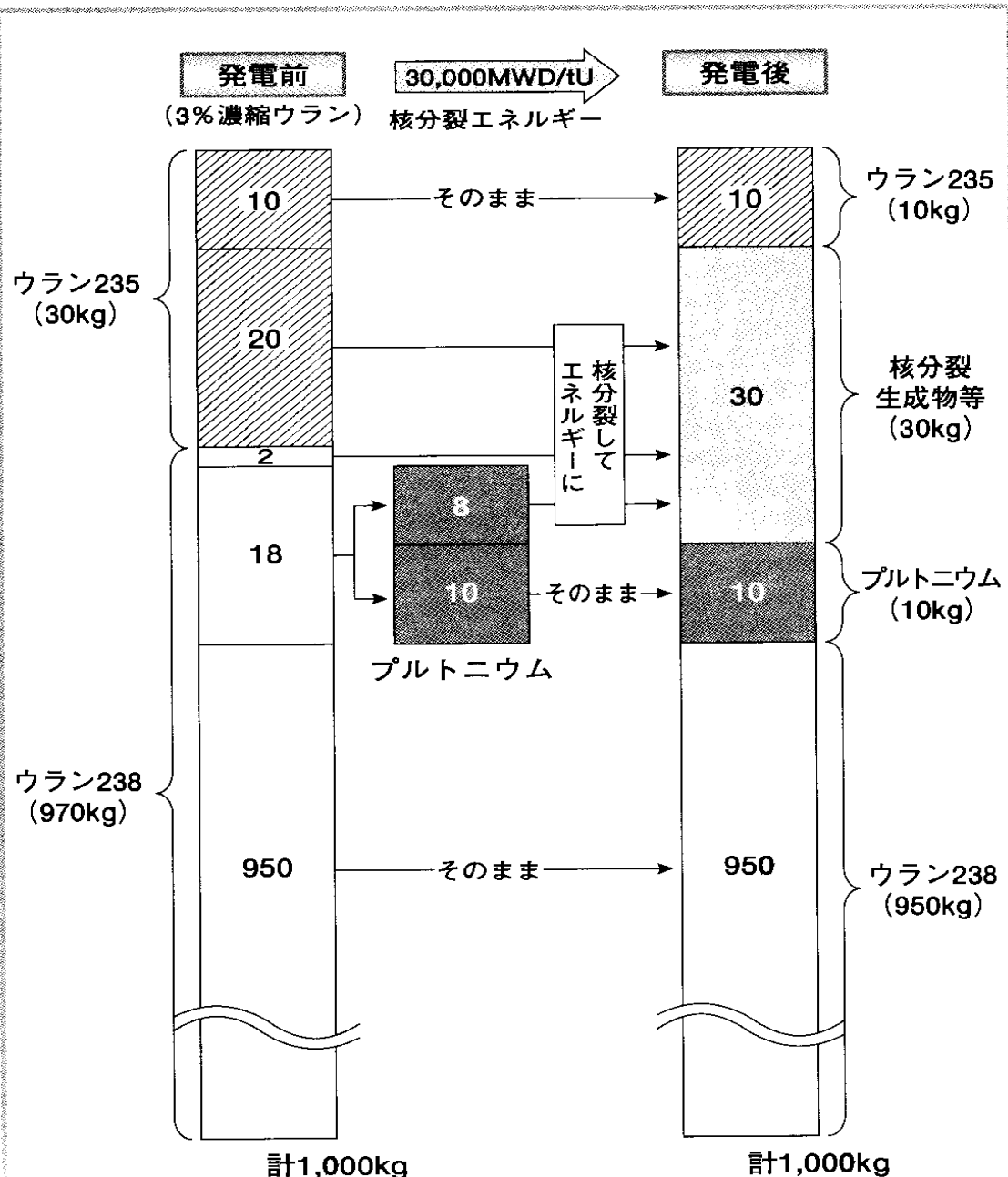
標準大気圧: 101.325 kPa  
7000 kPa 時の水の飽和  
温度は 285.79℃

	認可出力(万kW)	運転開始	建設費(億円)		
1号	46.0	1971年3月26日	391	GE	約40年間
2号	78.4	1974年7月18日	562	GE・東芝	約36年間
3号	78.4	1976年3月27日	624	東芝	
4号	78.4	1978年10月12日	803	日立	
5号	78.4	1978年4月18日	905	東芝	
6号	110.0	1979年10月24日	1754	GE・東芝	

	熱出力 (万kW)	冷却材圧力 (kPa)	入口温度 (℃)	出口温度 (℃)	流量 × 10 <sup>3</sup> t/h	平均熱流束 kW/m <sup>2</sup>	全ウラン 装荷量 (t)
1号	138	6894	177	285	21.8	393	68
2号	238.1	6934	196	286	33.3	486	94
3号	238.1	6934	196	286	33.3	519	94
4号	238.1	6934	196	286	33.3	519	94
5号	238.1	6934	196	286	33.3	519	94
6号	329.3	6934	216	286	48.3	483	132

流量  
← 約 6 t/s  
← 約 9 t/s

# ウラン燃料の核分裂による変化



出典：鈴木篤之著「原子力の燃料サイクル」

## ウラン燃料の核分裂による変化

出典：鈴木篤之 著 「原子力の燃料サイクル」

福島第1発電所2号は：熱出力：238.1万kW  
 =2381 MW、ウラン燃料総量：94t、  
 故に、熱出力は 25.33 MW/tU  
 従って、30000 MWD/tU の熱エネルギーを発生  
 するには(U-235 濃縮度を平均 3% と仮定)  
 1184.4 D = 3.24 年 の稼働が必要である。

$$E = mc^2 \rightarrow E [kJ] = 9.0 \times 10^{13} m [kg]$$

$$30000 [MWD] = 3 \times 10^4 \left[ 10^3 \frac{kJ}{s} \times 60 \times 60 \times 24 s \right]$$

$$= 2592 \times 10^9 [kJ]$$

$$\therefore 2592 \times 10^9 = 9 \times 10^{13} m \rightarrow m = 0.0288 [kg]$$

## ■ 燃料要素内の熱発生

「原子炉熱工学」 青木成文著 養賢堂  
昭和40年4月1日第1刷発行(1965年)

	即 発 性	遅 発 性	合 計	%
U内に発生 するエネルギー	核分裂生成物の運動エネルギー =168 Mev	核分裂生成物の $\beta$ 線=7 Mev	175 Mev	88
U外に分布 するエネルギー	中性子の運動エネルギー =5 Mev 分裂による $\gamma$ 線 =5 Mev 他の核反応 =7 Mev	核分裂生成物の $\gamma$ 線=6 Mev	23 Mev	12
分裂当りの 有効エネルギー	185 Mev	13 Mev	198 Mev	
そ の 他		中性微子 11 Mev		

◇ もし、原子核がちょうど半分ずつに分裂して、それぞれが同じエネルギーを持ったとすれば、新しい分裂破片の原子核は秒速7,000kmで飛んでいくであろう。

◇ 中性子の速度が秒速2万kmであれば、それらのエネルギーは(核分裂あたり2.5個の中性子が出るとして)5MeVとなる。

「原子炉と核反応入門」 篠原慶邦 訳 東京図書1966年8月10日 初版発行(45年前)  
著者 ア・エヌ・プロツエンコ



## ■ 原子炉停止後の熱発生割合

福島第1発電所 1号機: 電気出力 46万kW (=460MW)、熱出力 $Q_0=1380$  MW

運転時間:  $T_0 = \infty$  と仮定する。熱発生割合:  $Q/Q_0 = ?$

(水の蒸発熱(大気圧): 2256.9 kJ /kg)

### 運転停止後

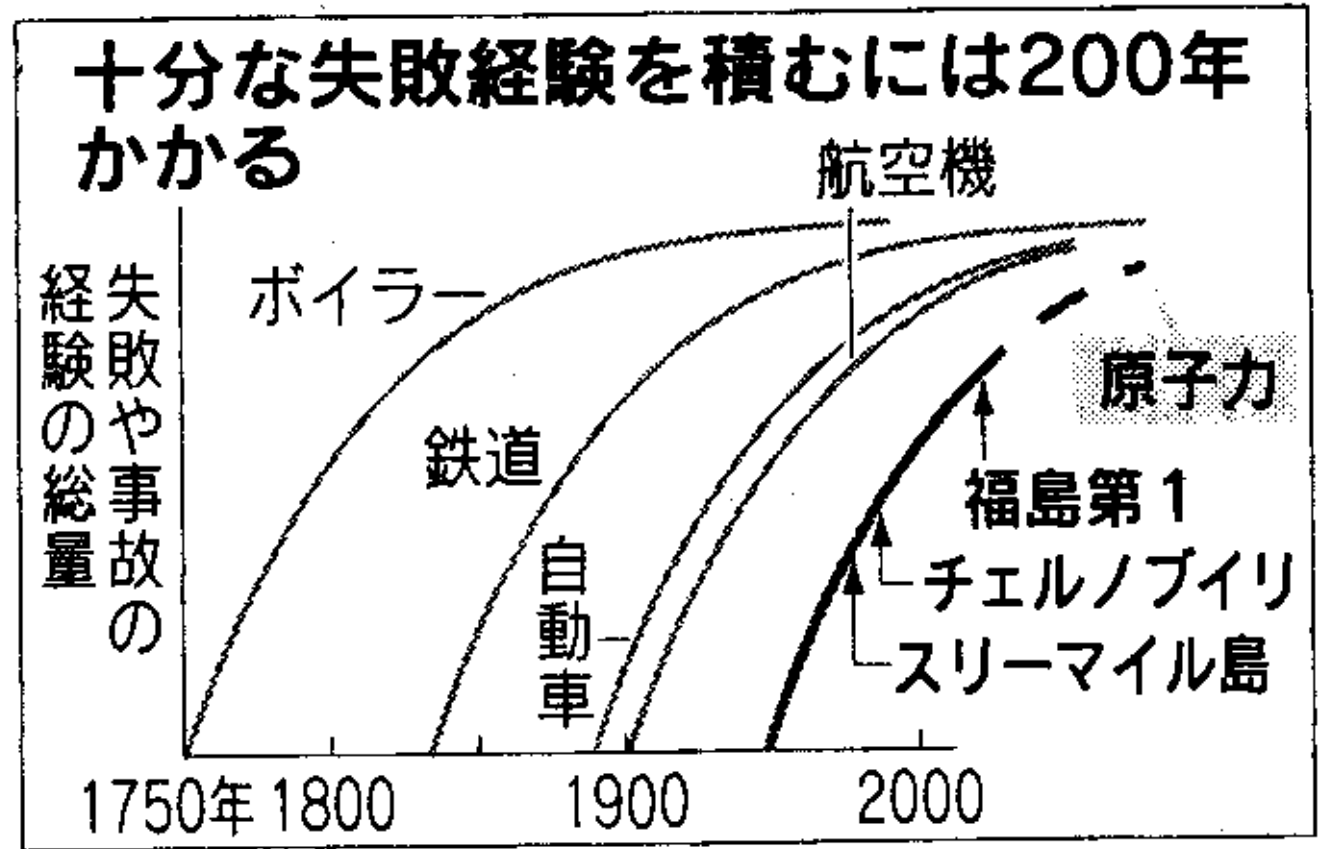
1秒後	$Q/Q_0 = 0.059$	$Q = 81420$ kW	蒸発量	36.07 kg/s = 129.9 t/h
1時間後	$Q/Q_0 = 0.016$	$Q = 22080$ kW	蒸発量	9.78 kg/s = 35.2 t/h
24時間後	$Q/Q_0 = 0.0073$	$Q = 10740$ kW	蒸発量	4.76 kg/s = 17.1 t/h
120時間(5日)後	$Q/Q_0 = 0.001$			
		$Q = 1380$ kW	蒸発量	0.611 kg/s = 2.2 t/h
1年後( $3.1536 \times 10^7$ sec)	$Q/Q_0 = 0.00067$			
		$Q = 923$ kW	蒸発量	0.408 kg/s = 1.47 t/h

# ■ 科学技術の役割 ― 原発事故に学ぶ(上) 畑村洋太郎

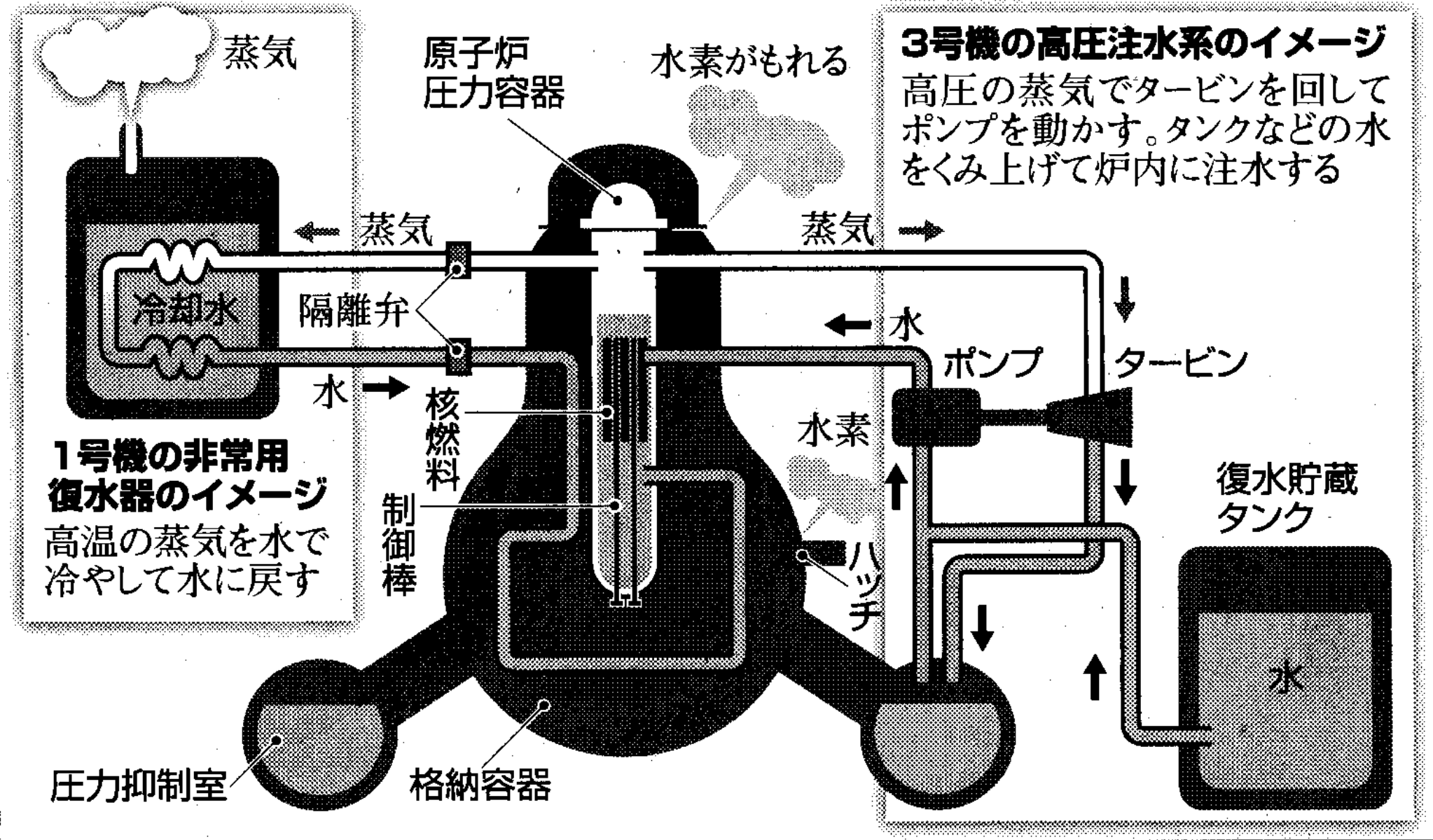
2011年5月30日 日経

- 人間には自分に都合の良い思考をする習性
- 津波など失敗の記憶も時間がたつとなくなる
- 事故が起きても危険が拡大しない設計重要

(安全性の実現手段には、人間がセンサーやシステムを使って危険を回避する「制御安全」と、事故が起きても製品や機械そのものが安全な方向に働くように設計されている「本質安全」がある。福島原発も当初は本質安全の考え方を取り入れていたようだが、コスト削減や効率性の観点から制御安全の考え方に変わっていったのではないか。)



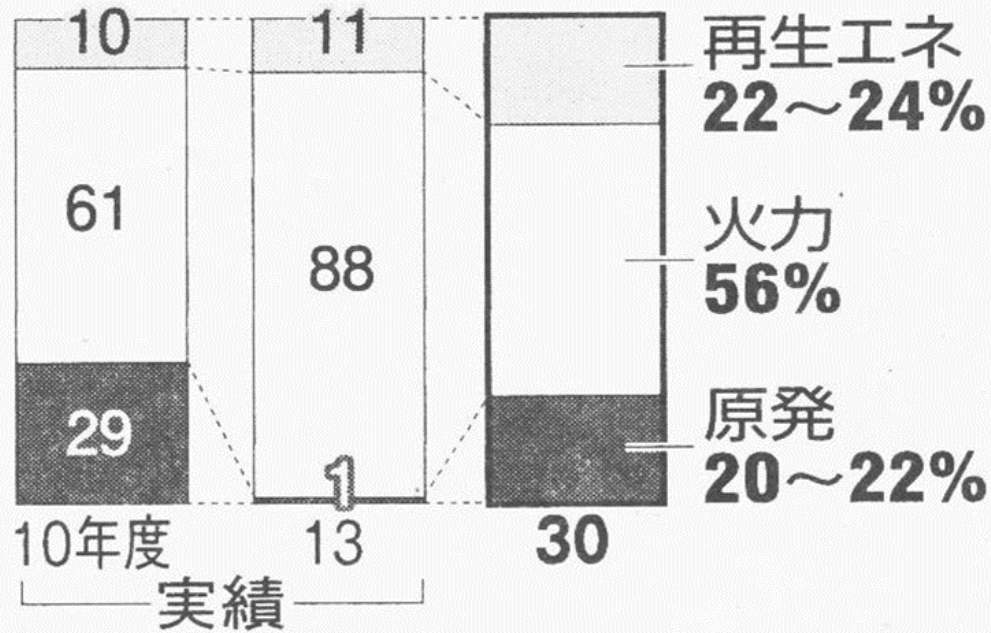
# 事故調査で焦点となった1、3号機の原子炉冷却の仕組み





# 原発コスト本当に最安？

## 2030年度の電源構成案



↑朝日新聞2015年7月9日

朝日新聞2015年7月1日→

## 2030年の電源構成と発電コスト

総発電量に  
占める割合

電源  
1kWhの発電コスト

