

ビーカーと水と電気ヒーターで構成する原子炉シミュレーターの試作

～ビーカーのお湯の冷め方・「電脳原子炉『m y 原子炉』」の制作～

茨城工業高等専門学校 ラジオ部 A班 代表 森脇滉

森脇滉、松田理絵、川上悠里、田島圭一郎、皆川仁志、内田匠平、
斉藤慶太、矢野倉伊織、八重樫拓也、一戸香澄、高橋雄太、芦名澤祐太

A trial for compose nuclear reactor simulator composed beaker, water, and electric heater

An analysis of how hot water in a beaker cools down : a challenge for “Physics Challenge”

Trial product of reactor simulator made by students

Abstract:

(1) Heat energy can transfer from hotter to cooler objects in the following three ways: conduction, convection and radiation. In addition, fluids in containers can be cooled down because of vaporization as well. In this experiment, we analyzed how hot water in a beaker cooled down, measuring the quantity of thermal energy in each case, namely, conduction, convection, radiation, and vaporization.

(2) We challenged to design a program that can estimate various parameters concerning a typical nuclear power plants by thermal output, reactor type, and AC frequency of nuclear power plants. Simple calculation was an easy way to find tendencies and rules of all data. In analysis process, we find some tendencies in which a parameter has direct connection with thermal output, or, it has a connection with another factor, besides thermal output.

I. はじめに

我が茨城高専ラジオ部は原子炉・原子力エネルギーに関する学習として、様々な関連施設の見学や、専門家の方を招いて幅広いお話を伺ったりするなどの活動をしてきた。しかし、それだけでは理解できないことも多かった。

そこで今回、原子炉の中で起きている熱現象を水と電気ヒーターで理解しながら、原子炉シミュレーターの試作することを目的とした。

ところが、実際にシミュレーターを作るとなると原子炉の静特性だけでなく動特性を理解しなければならず、かなり複雑になってしまう。

原子炉を運転する際に核分裂反応を制御するためには、制御棒の投入のほかに温度の上昇が関与することを知った。実際に軽水炉の原子炉（PWR/BWR）では、より核分裂反応を起こすために冷却水を用いて温度上昇を抑えようとしている。そのため、原子炉シミュレーターを制作するうえでは温度変化を考慮しなければならない（反応度の温度係数 $\Delta \rho / \Delta T$ を求める）。核物理のほか、熱力学の理解も必要になる。

そのため今回は、平時（平衡時）にはどのようにして温度が変化するか調査することを通して、「**お湯の冷め方の関数を導出する**」ことを試みた。

また、現在国内にある 50 余基の原子力発電プラントの公開データから原子力発電プラントの熱出力と各種設計パラ

メーター（約 80 項目の原子炉諸元）との関係を理解することを通して、プラントの設計をするようなプログラム「電脳原子炉『m y 原子炉』」を書くことができればと思い、製作に挑戦した。

II. ビーカーのお湯の冷め方

1. 方法

この実験では、主に 1000ml ビーカーに 500ml のお湯を入れて、温度計を用いて水温と気温を測定した。

実験に用いたビーカーは IWAKI 社製の PYREX 1000ml ビーカー、PYREX 500ml ビーカーを用いた。

お湯は、タイガー魔法瓶社製の電気ポット「とく子さん」PVN-A220 を用いて、水道水を 100[°C]まで沸かしたものである。

温度計は、pico Tehnilyg 社製 Dr.DAQ (パソコン計測アダプター)を用いた。この装置の温度センサーは、サーミスタを使用している。



図1 pico Technology 社製 Dr.DAQ (パソコン計測アダプター)(気温を測定するセンサーは基盤の上に、水温を測定するセンサーは右の2個の黒い部分である。)

詳しい実験方法については各セクションで説明する。

2. 温度計の誤差の確認

まず、温度計がどれほどの誤差を持っているのか確認し、今後のデータ補正の式を導き出す。

2.1 方法

まず、1000ml ビーカーに水と氷をいれる。これにより、ビーカー内は固体から液体へ相変化しているため、融点の0[°C]となる。このとき、各種温度計が示す温度 m を確認する。

次に、1000ml ビーカーに水を入れた後加熱し、沸騰させる。これにより、液体から気体へ相変化しているため、気圧、水の純度によって沸点は異なるが、ほぼ100[°C]となる。ここでは100[°C]になっているとする。このとき、各種温度計が示す温度 b を確認する。沸点の気圧依存性は、実際に高地(富士山頂、旧測候所)で測定し理科年表に出ている予測式を確認した(B班、富士山頂対応電気ポットの試作)。

そして、各種温度計が示す温度の補正式を導き出す。この導出は次のようになる。

温度計が示す温度を x 、実際の温度を y とする。

(0, m)、(100, b)の点を直線で結べたとすると

この直線の関数は

$$y-m=(b-m)/(100-0)(x-0)$$

$$\therefore y=(b-m)/100x-m$$

よって、温度計が示す温度の補正式は

$$y=(b-m)/100x-m$$

となる。

なお、今回は2.方法で説明した温度計の他に水銀温度計、アルコール温度計、デジタル温度計についても調査してみた。

2.2 結果

融点と沸点における各種温度計の温度とそれにより得られた補正式を表1に示す。

表1. 融点と沸点における各種温度計の温度と補正式

温度計	m[°C]	b[°C]	補正式
温度ロガー①	0.1	98.9	$y=0.988x-0.1$
温度ロガー②	1.5	99.2	$y=0.977x-1.5$
水銀温度計①	1.0	99.5	$y=0.985x-1.0$
水銀温度計②	2.0	100.0	$y=0.9800x-2.0$
アルコール温度計	1.0	95.5	$y=0.945x-1.0$
デジタル温度計	0.6	101.0	$y=1.004x-0.6$

2.3 考察

各温度ロガーの0[°C]点、100[°C]点とも大きく外れた値はでておらず、その他の温度計と同じほどの誤差であった。これより、この温度ロガーは、他と種類の温度計と同じようによく使用でき、誤差も同じ程度であると言える。

よって、今回温度補正をしなくても差し支えないとして、そのままの表示温度の値を使った。

3. お湯の冷め方がどのようになっているのか調査する

次に、お湯の温度がどのように変化するか調べ、大まかなお湯の冷め方をつかむ。

3.1 方法

まず、温度センサーの入った1000ml ビーカーに500mlのお湯を入れる。その後、180分まで毎分、水温と気温を読み取る。なお、ビーカーを設置する際、底面からの熱伝導を防ぐため、断熱材(今回は発泡スチロール)を敷いた上にビーカーを設置した。



図2 1000ml ビーカーに500mlのお湯を入れた場合の実験

3.2 結果

測定した水温と気温の変化を図3に示す。

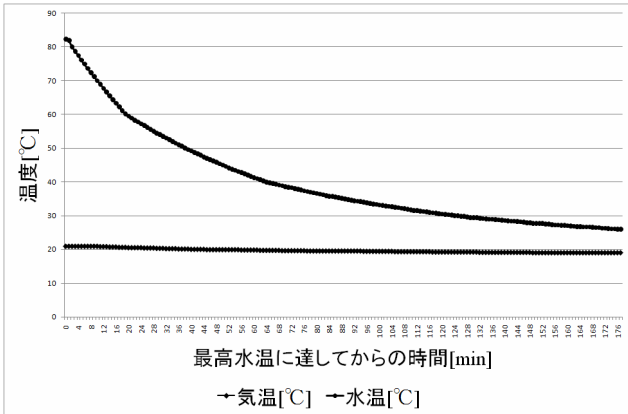


図3 1000ml ビーカーに 500ml のお湯を入れた場合の水温と気温の変化（蓋なし）

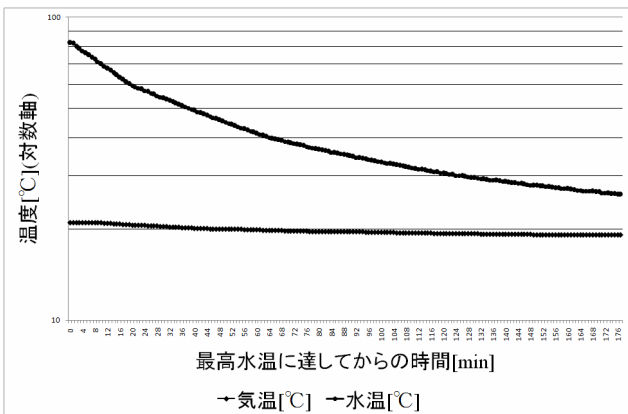


図4 片対数グラフで表した 1000ml ビーカーに 500ml のお湯を入れた場合の水温と気温の変化（蓋なし）

3.3 考察

お湯を入れてから、はじめは急激に温度が低下するが、時間が経つにつれて温度の下がり方が鈍くなり、気温に近づこうとしている。

これより、お湯の冷め方には水温と気温が関係していることが読み取れる。また、気温の変化の関数はお湯の冷え方の関数の漸近線となっていることも読み取れる。

しかしこれだけでは、分かりにくいので、物体の冷え方について調べてみたところ、「ニュートンの冷却の法則」といったものが出てきた。そこで、ニュートンの冷却の法則について解析してみることにした。

4. ニュートンの冷却の法則の検証

気化熱の影響を除いた場合にニュートンの冷却の法則が適用できるかを調べた。

4.1 解析の手法

ニュートンの冷却の法則を検証するために、1000[ml]のビーカーを使用し、口を断熱材の発泡スチロールで密閉したものと、通常の密閉されていないビーカーに約 80[°C]の湯を 500[ml]を入れ、180 分間湯を温度計で一分ごとに水温を測定し、結果を比較した。



図4 上下を発泡スチロールの蓋をして密閉したビーカーの外観。上下の断熱と、ビーカー内部の空間の締め出しにより、気化の防止と系外への散逸を抑えることができる。

4.2 ニュートンの冷却の法則の式

ニュートンの冷却の法則とは液体や気体などの媒質中におかれた高温の「固体」が媒質によって冷却される様子を表した法則で、媒質中の固体から媒質に熱が伝わる速度は、固体の表面積及び固体と媒質の温度差に比例する。すなわち固体の持つ熱量 Q 、時刻 t 、固体の表面積 S 、固体の温度 T 、媒質の温度 T_m の間には

$$\frac{dQ}{dt} = \alpha S(T - T_m)$$

が成り立つという。ここで比例定数 α は固体の表面及び媒質の性質によって決まる定数である。 T_0 とは $t=0$ における固体の温度とし、先ほどの法則を利用すると、

$$T = \exp\{(-\alpha S/C) \cdot t\} + T_m \quad \dots \dots (1)$$

が得られる。 C は測定物の熱容量である。

次に法則式の変形を行い、時間 t の一次関数の形にした。時刻を t 、固体の表面積 S 、時刻 t における液体の温度を T 、気温を T_m 、 $t=0$ における液体の温度を T_0 とすると

$$(T - T_m)/(T_0 - T_m) = \exp\{(-\alpha S/C) \cdot t\}$$

両辺の自然対数(log)をとると、時刻 t に対する

$$\log\{(T - T_m)/(T_0 - T_m)\} = (-\alpha S/C) \cdot t \dots\dots (2)$$

という式ができる。

このグラフの傾きが一定で、その値が

$$\alpha S/C \dots\dots (3)$$

であるとき、ニュートンの冷却の法則が成り立っていることとなる。つまり、今回の検証では具体的な α 、 S 、 C の値を求められないので、(2)の関数が直線ならニュートンの冷却の法則が成り立っているとした。

4.3 ニュートンの冷却の法則の検証の結果

蓋つきのビーカーの温度を測定した時と蓋なしのビーカーの温度を測定した時の気温が違うので、水温と気温の差のグラフを作成した。そして二つのビーカーについて2式の値を求めグラフ化し、そのグラフが直線になるかを調べた。直線に近いかを検証する方法として、一分毎の傾きの値を求めそれをグラフ化した。

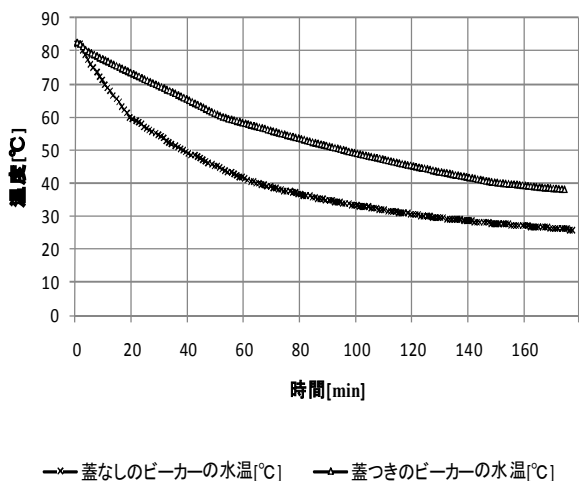


図5 蓋つきビーカーと蓋なしビーカーの時の時間と湯の温度の関係

図5のグラフは蓋つきビーカーと蓋なしビーカーで中に入れた湯の冷め方の違いについて表したグラフである。ただし、お湯の温度は、80°C～室温の範囲の場合である。

蓋なしの場合、 $T_m = 21.0[^\circ\text{C}]$ 、 $T_0 = 82.3[^\circ\text{C}]$

蓋ありの場合、 $T_m = 26.6[^\circ\text{C}]$ 、 $T_0 = 82.6[^\circ\text{C}]$

本来は 100[°C]付近から測定をしたかったのだが準備に少々時間がかかったため、80[°C]付近からの測定となった。

蓋なしのビーカーの場合、温度はこのような曲線のようなグラフになるのに対し、蓋つきビーカーは直線に近い形のグラフになった。また、蓋つきビーカーの場合、湯の気化は考えなくてよい。つまり、気化による熱移動というものが今回の実験における湯の温度変化を考える場合に重要な

部分であるということが予測できる。

以下に、図6の結果を用いて「2-2 ニュートンの冷却の法則の検証」ですでに述べた(2)式を数値化し、時間との関係をグラフにして表した。

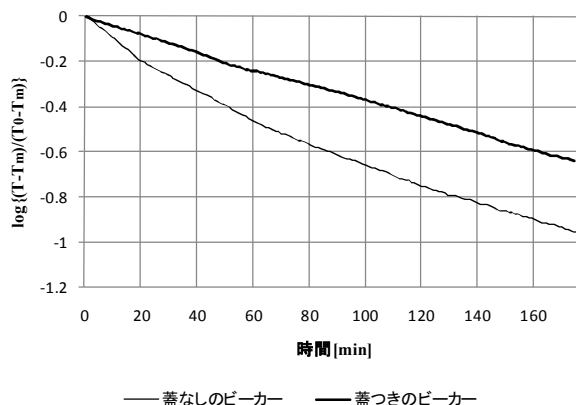


図6 蓋つきのビーカーと蓋なしのビーカーの時間と(2)式の値

上に表されているとおり、(2)式の値のグラフは蓋つきビーカーの方が蓋なしビーカーと比較したとき、より直線的なグラフになっている。

また、以下に(2)式の傾きと時間との関係を表す。

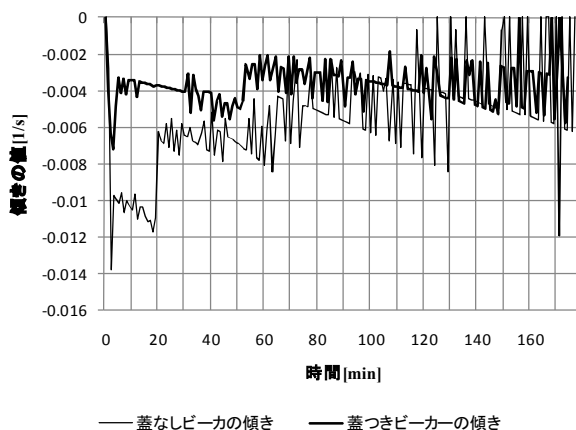


図7 蓋つきのビーカーと蓋なしのビーカーの時間と(2)式の傾きの関係

上の図7のグラフのままでは測定値の有効桁数が足りなく、値が上下しているため、分かりづらい。よって、以下にエクセルの直線近似の機能を用いて直線にしたグラフを表す。

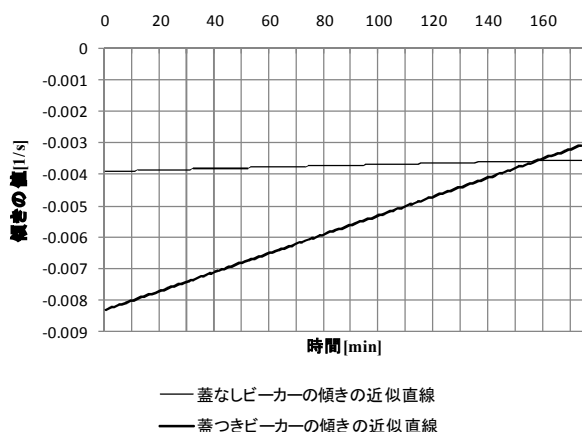


図8 蓋つきのビーカーと蓋なしのビーカーの時間と(2)式の傾き(直線近似後)

グラフより蓋ありビーカーでは傾きの値がほぼ一定であることが言える。蓋なしでは傾きの値が、単調に減り一定ではない。これは、気化熱の影響で実験初期に温度が急激

に下がることが原因である。

蓋なしビーカーの傾きの直線近似グラフと蓋ありビーカーの傾きの直線近似グラフを比べると蓋ありビーカーの方が傾きが少ないことが分かる。よって気化熱の影響を少なくすることにより中程度の湯温ではニュートンの冷却の法則を適用することが可能である。

この結果は気化による熱移動が液体(今回は水)におけるニュートン冷却の法則が適用できない理由であるということが証明されたわけであるが、まだ気化、輻射、伝導による各熱移動量それぞれを具体的に表して気化がニュートン冷却の法則が適用できない原因であるということを証明したわけではない。よって、これより各熱移動経路における熱の移動、およびその割合を表して検証していくとする。

5. 各熱移動経路における熱の移動量

5.1 解析の手法

湯の熱の逃げ方の分析法について述べる。実験方法は、200 [ml]ビーカーに約 80[°C]のお湯 200[ml]を入れたものと熱量計の銅製のカップに約 80[°C]のお湯 200[ml]を入れたものについて、一時間の間一分毎にその時の温度と質量を計るものである。物体の熱の移動には一般的に伝導、輻射、対流がある。そして今回は気化熱による熱の移動も考える。さらにお湯と外気は対流しないので対流によって熱は移動しないととした。そうなると伝導、輻射、気化による熱の移動だけを考えるだけでよいことになる。伝導に関しては直接求めないで全体の熱の移動分からほかの二つの要素による熱の移動分を引くことによって求めた。なお、実験した

部屋の気温を T_m 、実験を始めた時の湯の温度を T_0 とする。



図9 実験の様子。左側が銅製の容器、右側が 200[ml]ビーカーである。今回の実験では、どちらの容器も電子天秤の上に載せ、質量変化と同時に湯の温度も測定した。使用した電子点天秤の感量は 330[g]である。

5.2 気化による質量減少

気化による熱の逃げを算出するためにまず電子天秤を用いて湯の一分毎の質量を測定した。以下に一分毎の質量の減少量、つまり気化によって減少した湯の質量のグラフを示す。

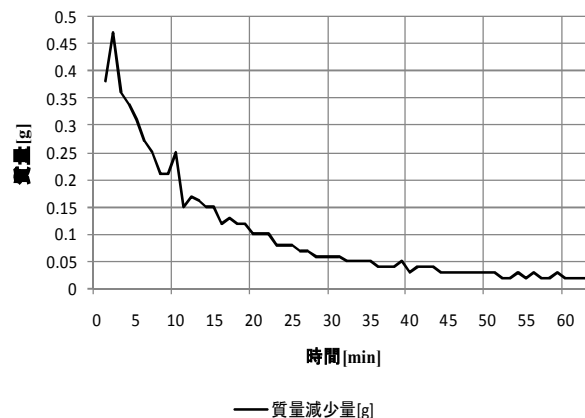


図10 湯をビーカーに入れた時の、時間と湯の気化による質量減少の関係(水温…80[°C]~室温、蓋なし、 $T_m=23.0[°C]$ 、 $T_0=79.0[°C]$)

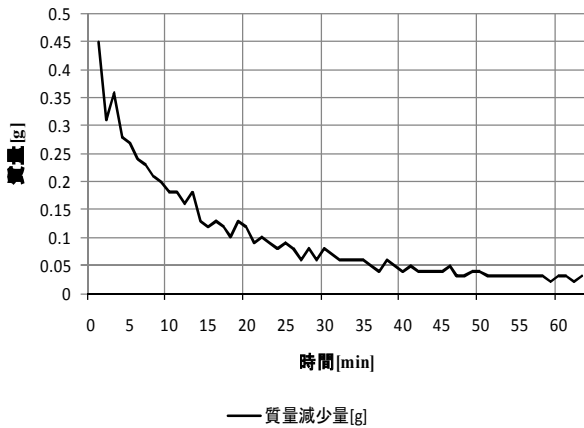


図 11 湯を銅製の容器に入れた時の、時間と湯の気化による質量減少の関係 (水温…80[°C]～室温、蓋なし、 $T_m=23.0[°C]$ 、 $T_0=81.2[°C]$)

図 10、図 11 のグラフから読み取れるように、開始直後、つまり湯の温度が高い状態であると気化によって失われた湯の量は大きく、30 分を過ぎたあたりから気化による質量の逃げは少なくなった。つまり、湯の温度が高ければ気化量が増加し、低ければ減少することが湯の温度と時間の関係を表したグラフから読み取れる。このグラフから、気化による湯の熱の逃げのグラフも直線のようなグラフではなく、曲線のグラフになることが予想される。

5.3 気化による熱の移動量の分析法

一分毎の気化熱による熱の逃げを求めるために、ビーカ一の質量と温度を一時間一分毎計った。水が気化することによって失う熱量 $Q[J]$ は、気化した水の質量を $m_q[g]$ 、水の気化熱を $q \approx 2256[J/g][2]$ (539[cal]) とすると、次式であらわされる。

$$Q = m_q \cdot q$$

以下に気化によって減少した分の水の質量と時間との関係のグラフと、上記の式を用いて水が気化したときに失った熱量 Q と時間 t の関係を表す。

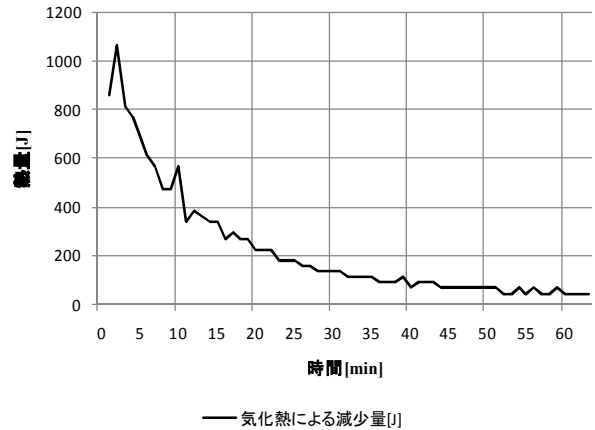


図 12 湯をビーカーに入れた時の、時間と気化熱の量の関係 (水温…80[°C]～室温、蓋なし $T_m=23.0[°C]$ 、 $T_0=79.0[°C]$)

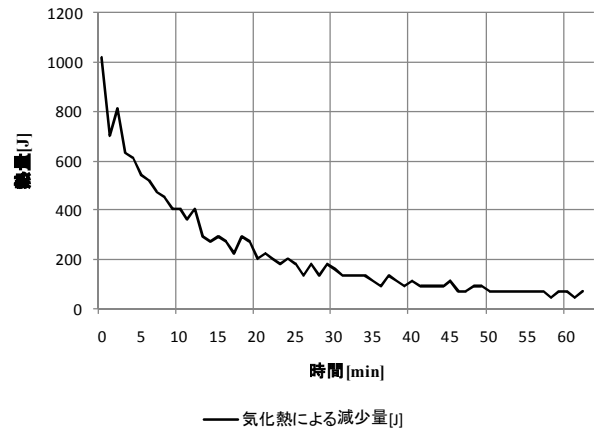


図 13 湯を銅製の容器に入れた時の時間と気化熱の量の関係 (水温…80[°C]～室温、蓋なし、 $T_m=23.0[°C]$ 、 $T_0=81.2[°C]$)

図 12、図 13 のグラフから時間がたつにつれて気化による熱の減少量が減っていくことがわかる。時間がたつにつれて減っていくということから、液体が高温のときは気化する水の量が多く、液体が低温になるにつれて気化する水の量が減ることがわかる。

5.4 輻射による熱の移動量の分析法と結果

輻射による熱の移動は温度の関数として表せることが知られている。シュテファン-ボルツマンの法則[2]から物体の絶対温度を $T_s[K]$ 、シュテファン-ボルツマン定数を $\sigma[W/m^2K^4]$ 、単位時間、単位面積当たりの放出エネルギーを P とすると、

$$P = \sigma \cdot T_s^4$$

が成り立つという。また物体は輻射によるエネルギーを 100[%]放出せず、一定の割合で放出する。その割合を放射

率と呼び、ここで ε とする。さらに、物体は周りの空気から輻射熱を受けていることを考慮し、空気の温度を T_1 とすると先の式は

$$P = \varepsilon \cdot \sigma (T_s^4 - T_1^4)$$

となる。

今回空気の温度は常に一定とすると、 T_1^4 は一定値なので、 T_s^4 の関数となる。この P の値に放射した時間と表面積をかければ熱量が求められるのだが、 P は T_s の値から刻一刻と値が変わるので、一分毎の輻射による熱の逃げを求めるためには一分毎の平均の P の値を求めてから表面積と放射した時間をかければよい。積分を用いてもよいが、今回は2分間単位で考えてその間の1分のときの値を平均値とした。放射率は実際に計測することができる。その方法では、放射率の設定を可変できる放射温度計と放射率が0.95の黒体テープを用いる。計測方法はまず容器に黒体テープを張り付けて、放射温度計の放射率を0.95に設定して黒体テープの部分の温度を測る。そして容器の表面の温度を測定して、その温度の値が黒体テープの部分の温度と等しくなるように再度放射率を設定する。その放射率の値が容器の放射率となる。今回は八光社のホームページ[3]に載っていた放射率表の値を用いた。銅の普通光沢面の放射率が0.072でガラスの放射率は0.95である。

これらのことを用いて、以下に湯の時間と輻射による熱移動の関係を表したグラフを示す

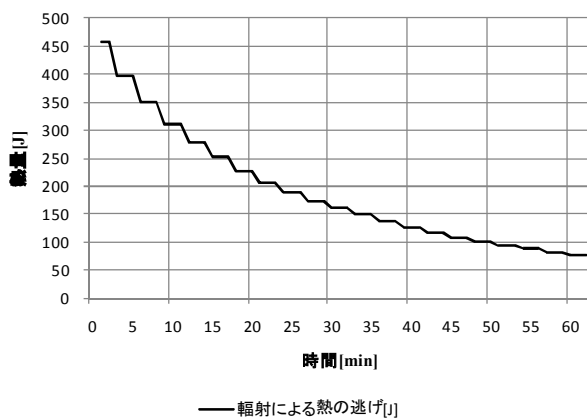


図 14 湯をビーカーに入れた時の、時間と輻射熱の量の関係温度範囲、(80[°C]~室温、蓋なし、 $T_m=23.0[°C]$ 、 $T_0=79.0[°C]$)

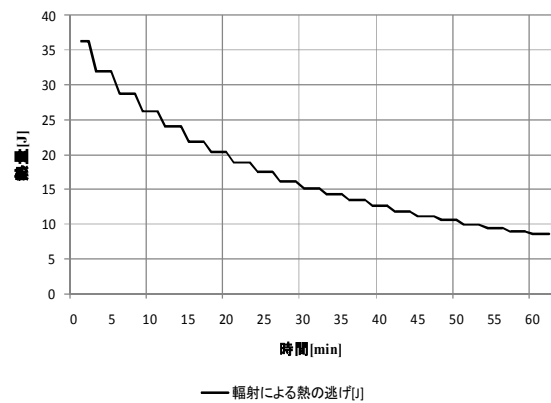


図 15 湯を銅製の容器に入れた時の、時間と輻射熱の量の関係 (水温…80[°C]~室温、蓋なし、 $T_m=23.0[°C]$ 、 $T_0=81.2[°C]$)

5.5 伝導による熱の移動量の分析法と結果

伝導による熱の移動 Q_d は、熱の逃げの総量 Q から気化による熱の逃げ Q_k と輻射による熱の逃げ Q_h を引くことで求められる。

$$Q_d = Q - (Q_k + Q_h)$$

この式から伝導による熱の逃げと時間とのグラフを作成した。データがばらつくのは、測定値同士の引き算による有効数字の桁落ちのためである。

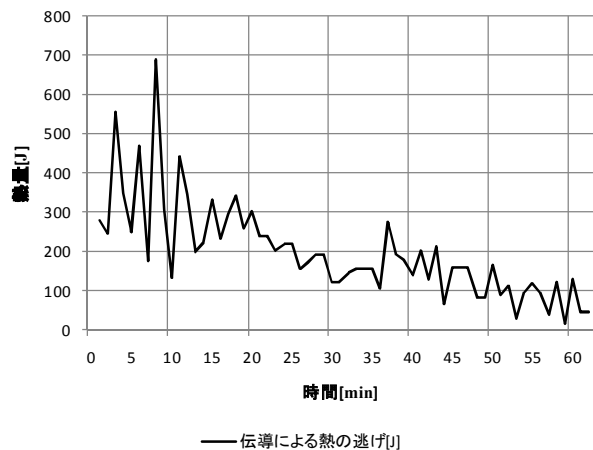


図 16 湯をビーカーに入れた時の、時間と伝導の量の関係 (水温…80[°C]~室温、蓋なし、 $T_m=23.0[°C]$ 、 $T_0=79.0[°C]$)

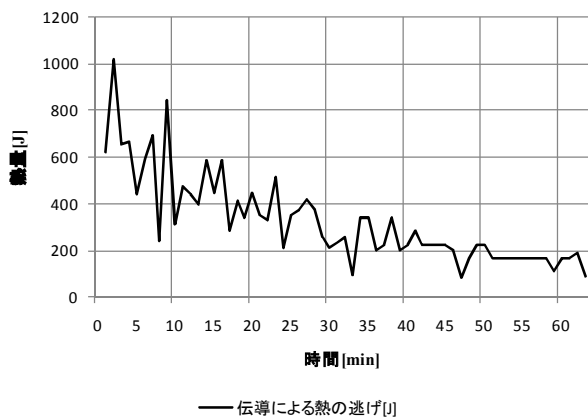


図 17 湯を銅製の容器に入れた時の、時間と伝導の量の関係 (水温…80[°C]~室温、蓋なし、 $T_m=23.0[°C]$ 、 $T_0=81.2[°C]$)

5.6 両容器の全体の熱の移動量における気化、輻射、伝導での熱の逃げの量とその割合

以下に、5.3、5.4、5.5 で求めた気化、輻射、伝導それぞれの熱移動経路による熱の移動量と全体の熱の逃げの量、および割合と時間の関係を示したグラフを示す。

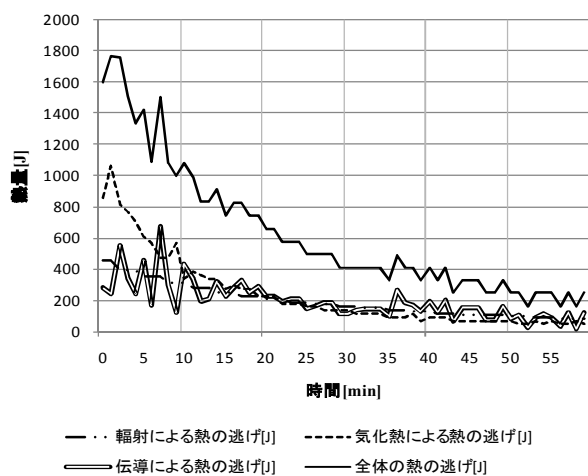


図 18 ビーカーでの、時間と各熱移動経路で逃げた熱の量の関係 (80[°C]~室温、蓋なし、 $T_m=23.0[°C]$ 、 $T_0=79.0[°C]$)

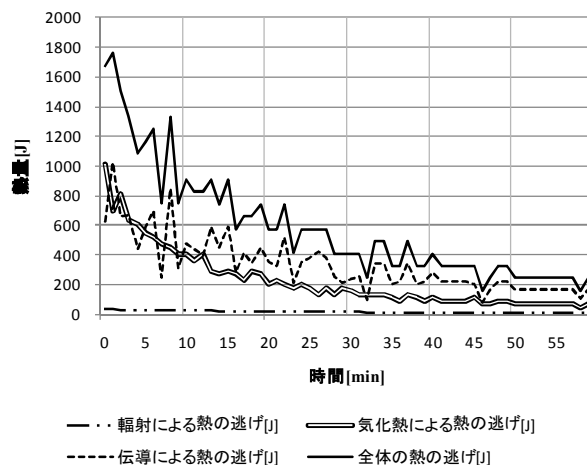


図 19 銅製の容器での、時間と各熱移動経路で逃げた熱の量の関係 (水温…80[°C]~室温、蓋なし、 $T_m=23.0[°C]$ 、 $T_0=81.2[°C]$)

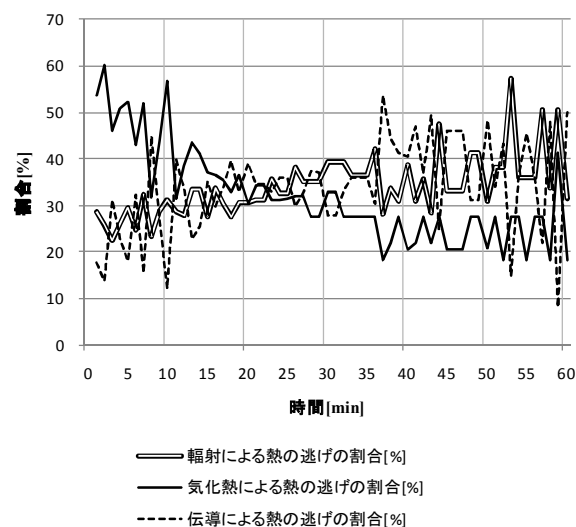


図 20 ビーカーでの、時間と各熱移動経路で逃げた熱の割合の関係 (80[°C]~室温、蓋なし、 $T_m=23.0[°C]$ 、 $T_0=79.0[°C]$)

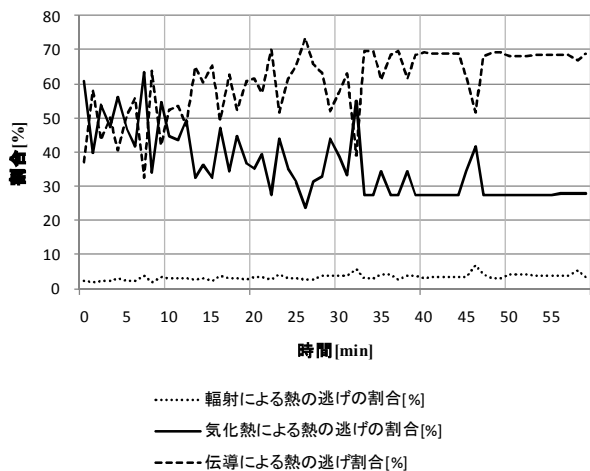


図 21 銅製の容器での、時間と各熱移動経路で逃げた熱の割合の関係（水温…80[°C]～室温、蓋なし、 $T_m=23.0[°C]$ 、 $T_0=81.2[°C]$ ）

5.8 考察と結論

前項で 80[°C]～室温の温度範囲で 1 分ごとの各経路における熱の逃げの割合のグラフを作成したが、それを元に 10 分ごとに分けたときの各経路における熱の逃げの割合の表を作成した。

表 2 ビーカーで 10 分ごとに各経路の熱の逃げの割合を求めた表

時間 [min]	気化による	気化による	輻射による	輻射による	伝導による	伝導による	全体の
	熱の逃げ [J]	熱の逃げの割合 [%]	熱の逃げ [J]	熱の逃げの割合 [%]	熱の逃げ [J]	熱の逃げの割合 [%]	
10	6893	49.05	3775	26.87	3384	24.08	14052
20	3096	21.80	2581	18.17	8526	60.03	14203
30	1718	31.61	1866	34.34	1850	34.05	5435
40	1040	25.85	1440	35.80	1543	38.35	4022
50	745.8	23.34	1108	34.67	1342	41.99	3195
60	542.4	24.55	872.2	39.48	794.4	35.96	2209
一時間合計	14030	32.55	11640	27.00	17440	40.00	43120

表 3 銅製の容器で 10 分ごとに各経路の熱の逃げの割合を求めた表

時間 [min]	気化による	気化による	輻射による	輻射による	伝導による	伝導による	全体の
	熱の逃げ [J]	熱の逃げの割合 [%]	熱の逃げ [J]	熱の逃げの割合 [%]	熱の逃げ [J]	熱の逃げの割合 [%]	
10	6170	49.00	307.7	2.44	6114	48.56	12592
20	3096	39.89	225.3	2.90	4440	57.21	7762
30	1831	33.77	172.3	3.18	3418	63.05	5421
40	1243	32.31	138.7	3.60	2465	64.08	3847
50	904	29.13	113.0	3.64	2086	67.22	3103
60	655	27.73	93.8	3.97	1615	68.30	2364
一時間合計	13900	39.61	1051	2.99	20140	57.39	35090

まず、80[°C]～室温の温度範囲で一時間全体での熱の逃げの割合で一番大きな割合を占めていたのは、ビーカー、銅製の容器ともに伝導によるものだった。しかし、実験開始から 10 分間は気化熱による割合が一番か伝導によるものとほぼ同等で、ビーカーの場合の割合は 49.05[%]、銅製の容器の場合には 49.00[%]であった。気化熱による熱の逃げは 10 分以後では伝導よりも割合が少なくなった。このことから、ニュートンの冷却の法則が今回のような液体が外気と触れているときの温度変化に適用できない理由が説明できる。つまり、本来は伝導と輻射によって熱が逃げていくのにそこに気化による熱の逃げが加算される。気化による熱の減少量は 5.3 章で説明したとおり、液体の温度が高いほど大きくなる。液体の温度が高いときには気化熱による熱の逃げが大きくなるのだが、温度が下がるに連れて気化による熱の逃げが少なくなるので、 $\log((T-T_m)/(T_0-T_m))$ の値のグラフは本来線形になるのだが曲線となる。蓋つきビーカーの場合、湯が気化することは少ないため、気化による熱の減少を考えなくてよい。つまり、輻射と伝導による熱の逃げのみを考えればよいので、このために図 4 の蓋つきビーカーの近似曲線は、蓋なしビーカーの近似曲線と比べて直線に近い形になり、ニュートンの冷却の法則が適用できる。

これらのことより、外気と触れている湯が冷めていく場合には、気化による熱の逃げの影響が大きく、全体の熱の逃げの総量の 2 割強から 5 割弱を占めていた。これがニュートン冷却の法則が成り立たなくなる原因であるということが証明できた。

6. 結論

今回ニュートンの冷却の法則が液体が外気と触れているときの温度変化に適用できない理由が定量的に説明できた。つまり、液体が外気に触れているとき伝導と輻射によって熱が逃げていくのに加えて気化による熱の逃げが加算される。気化による熱の減少量は、液体の温度が高いほど大きくなる。液体の温度が高いときには気化熱による熱の逃げが大きくなるのだが、温度が下がるに連れて気化熱による熱の逃げが少なくなるので、温度の下がり方は指数関数の曲線ではなくなる。

しかし蓋つきビーカーの場合、湯が気化することはないため、気化による熱の減少を考えなくてよい。つまり、輻射と伝導による熱の逃げのみを考えればよいので、蓋なしビーカーのグラフと比べて指数関数に近い形になり、ニュートンの冷却の法則が適用できる。

よって、容器に入った液体の温度変化を時間の関数で表す場合には気化熱も考慮しないとイケないといえる。

Ⅲ. 「電脳原子炉『my 原子炉』」の制作

1. 世界の発電用原子炉

現在世界で稼働中の原子力発電プラントは、表4より、設備容量で言ってもまた原子炉基数で言っても、加圧水型軽水炉（PWR）、沸騰水型軽水炉（BWR）の2種類の原子炉だけで世界の原子力開発プラントの約80%を超えることが分かる。世界的には加圧水型軽水炉（PWR）が多くの割合を占めている。さらに、重水炉（HWR）、軽水炉冷却黒鉛減速炉（LWGR）まで加えれば設備容量で言っても、また原子炉基数で言っても95%を超える。

それに比べて表5から日本の傾向をみると、炉型はPWRとBWRのみで、しかも沸騰水型軽水炉（BWR）の方が半数以上である。

表4 炉型別の世界の原子力発電設備（運転中）
（原子炉基数、2009年1月1日現在[5]）

	基数(基)	割合(%)	累計(%)
加圧水型軽水炉 PWR	264	61.11	61.11
沸騰水型軽水炉 BWR	92	21.29	82.40
重水炉 HWR	44	10.19	92.59
軽水冷却黒鉛減速炉 LWGR	12	2.78	95.37
ガス炉 GR	18	4.17	99.54
高速炉 FR	2	0.46	100.0
合計	432	100.0	

表5 炉型別の日本の原子力発電設備（運転中）
（原子炉基数、2009年1月1日現在[5]）

	基数(基)	割合(%)	累計(%)
加圧水型軽水炉 PWR	23	43.40	43.40
沸騰水型軽水炉 BWR	30	56.60	100.0
合計	53	100.0	

次に各パラメータについて熱出力との関係を求めた。

2. 解析方法

2.1 第1段階 平均・標準偏差・変動率

現在日本で稼働している加圧水型原子炉（PWR）および沸騰水型原子炉（BWR）の原子力発電所の発電プラントの設計パラメータの数値データを解読し、その規則性を探り、任意の出力の原子力発電プラントの設計パラメータ（原子炉諸元）を推定できるようにすることを目指した。

解析に用いた基礎数値データは、原子力文化振興財団刊の原子力基礎講座全10巻の第3分冊「原子力発電」（平成8年3月（改定第5版））[5]の巻末付表2、4、5とした。

この付表は一部、通産省刊「原子力発電便覧」'95を参照しており、1995年（平成7年）12月末現在のデータである。

それ以降の時期に操業を開始した原子力発電プラントは、PWRでは泊3号（2009）、BWRでは女川原子力3号（2002）、東通原子力1号（2005）、改良沸騰水型（ABWR）柏崎刈羽6号（1996）、7号（1997）、浜岡原子力5号（2005）、志賀原子力2号（2006）のみで、このうちPWR・BWRのデータ解析に直接影響のある原子炉は、PWRでは泊3号（2009、92.2MWe）、BWRでは女川原子力3号（2002、82.5MWe）、東通原子力1号（2005、110.0MWe）の3炉にすぎない[1]。

よって、PWR・BWRのデータ解析には、第3分冊「原子力発電」[1]の巻末付表2、4、5のデータのみを用いた。共同作業のデータ解析にあたり、扱うデータ群の範囲および単位を明確にしておくことはデータ量の多さ以上に重要であると考えたからである。

改良型原子炉 APWR、ABWRについては他のデータ類から収集した。

2.2 各パラメータと熱出力との原理的考察からの直線関係

「原子力発電」の付表[5]を参考に、全て原子炉プラントのパラメータと熱出力との相関関係を調べる。その中で、熱出力との相関関係が弱いと判断できたものについては、どのような規則性の下でその値が算出されているのかを考えた。

この時、近似式は直線回帰（最小自乗法）を原則とする。近似式と共に決定係数の二乗（ R^2 ）も算出することにする。直線回帰のままだと決定係数が小さい値にしかならないことがあるが、近似式の次数を高くしてしまうと、データが存在する出力は正確な値を算出することができるが、データ群から外れた出力や、データとデータの間の出力に対するそれぞれのパラメータの値を算出しようとする、妥当とは言えないであろう数値が算出されてしまうためである。

また、この解析の際に用いるのは表計算ソフト Excel とした。その理由は、自力で計算プログラムを組むよりも遥かに容易で、且つ、データに対して多様な処理を行えるからである。以下、本稿ではPWRを中心に報告する。

3. 解析結果・考察

3.1 第1段階 平均・標準偏差・変動率

表6 原子炉パラメータの平均・標準偏差・変動率 (PWR)

パラメータ	平均	標準偏差	変動率	
熱出力[MW]	2517.90	771.40	0.310	
電気出力[MW]	842	270.400	0.321	
炉心	冷却材圧力 [kg/cm ² g]	157	0.000	0.000
	冷却材温度入口 [°C]	287.7	2.000	0.006
	冷却材温度出口 [°C]	322.8	2.000	0.006
	冷却材流量 [10 ³ t/hr]	44.3	12.700	0.287
	主要寸法/ 炉心有効高さ[m]	3.60	0.100	0.028
	主要寸法/ 炉心等価直径[m]	2.90	0.400	0.138
	全ウラン装荷量 [t]	68.3	17.200	0.252
	平均熱流速 [kcal/m ² h]	504130.4	28068.600	0.056
燃料	燃料集合体/ 個数[個]	155.4	29.700	0.191
	燃料集合体/ 燃料要素配列	244.3	44.800	0.183
	燃料集合体/ 燃料要素数[本]	36228.7	12440.400	0.343
備 原子炉冷却系統設	冷却材(またはポンプ)/容量[t/h]	19960.9	866.600	0.044
	加圧器/容量 [t/h]	38.4	9.600	0.250
	蒸気発生器/ 個数[個]	3.0	0.800	0.267
タービン発電機設備関係	蒸気タービン/ 出力[MW]	842	270.400	0.321
	蒸気タービン/ 回転数[rpm]	1773.9	86.400	0.049
	タービン入口蒸気圧力[kg/cm ² g]	56.1	2.900	0.052
	蒸気タービン入口温度[°C]	271	3.300	0.012
	蒸気タービン/ 蒸気流量[t/h]	4757	1497.400	0.315
	容量/[kVA]	940608.7	294586.000	0.313
回転数[rpm]	1773.9	86.400	0.049	

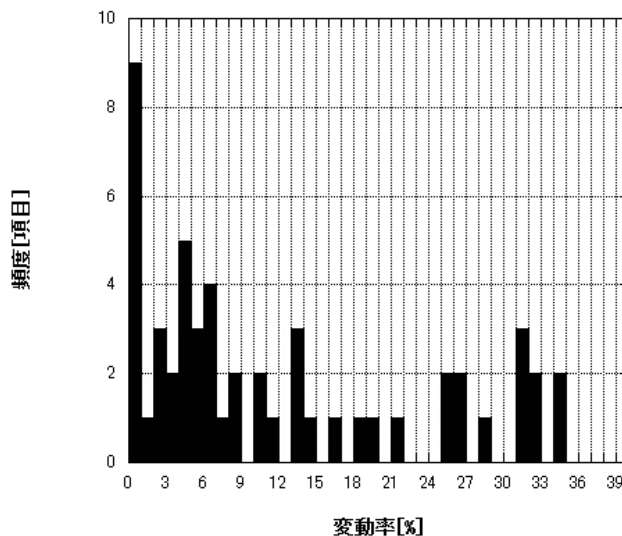


図22 頻度対パラメータの変動率 (PWR)

表6を作成した段階では、それぞれのパラメータの持つ意味が分からないものばかりだったので、すべてのパラメータの平均値、標準偏差、変動率(=標準偏差/平均値)を求めた。その変動率を示したのが図22である。

これより、パラメータの変動率[0%]のもの、 $0 < x \leq 20$ [%]のもの、 $20 \leq x$ [%]のものに分類できるのではないかとみた。

変動率とパラメータを見ていくと、 $20 \leq x$ [%]のものに関しては、熱出力との関連性がみられるのではないかと推測できるものだった。

この表6と元データ[5]を見ていく中で、プラントの建設から時間が経ち過ぎていて、それまで含めて考えるとかえって傾向が見えなくなるような旧型の原子炉が出てきた(関西電力 美浜第1号:昭和45年建設)。よって、これ以降の考察や計算では美浜第1号を除外したものを使用する。

また、この表6(または美浜第1号を除外して作成した表)において変動率が2[%]以下のものは定数とみなすと設定した。

3.2 第2段階 各パラメータと熱出力との原理的考察からの直線関係

原子炉の各パラメータの解析結果は、以下のように3つの傾向にまとめられることが分かった。

1. 出力との相関関係が強いもの
2. 熱出力との直線関係はあるが、他の要素も絡んできているもの
3. 熱出力との直線関係が弱いもの

以下で、それぞれの傾向が特に強く現れたものをいくつか挙げてみる。

3.2.1 熱出力との直線関係が強いもの

(1) 電気出力

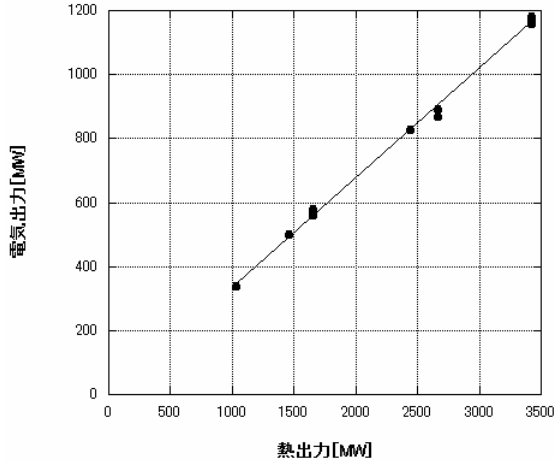


図 23 電気出力対熱出力 (PWR)

近似式 : $y = 0.3425x - 6.3417$ (x:[MWt], y:[MWe])
 決定係数 R^2 (以下 R^2 とする) : 0.9968

図 24 は、各炉の電気出[MWe]を熱出[MWt]で割ることで算出した発電効率である。この発電効率の平均値は 33.98[%]であった。標準偏差は 0.65[%]である。よって、変動率は 1.91[%]であったため、計算に用いる発電効率は平均値の 34.0[%]でとした。図 23 より、熱出力は熱出力[MW]にほぼ比例する。そして、図 23 で発電効率は一定であるので図 23 と図 24 は矛盾しない。

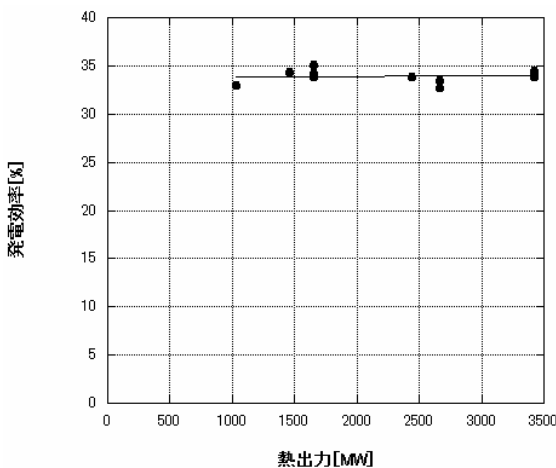


図 24 発電効率対熱出力 (PWR)

$y = 0.00004x + 33.88037$ $R^2 = 0.00264$

また、この発電効率の上限はカルノーサイクル (式 1) によって理論的に説明される。計算上、軽水炉 (出口温度約 300[°C]) では熱効率は約 48[%]である[7]。しかし、理論上

の値と実際に運用した場合の値は必ずしも一致するとは限らない。様々な環境要因が重なり、理論値よりも効率が落ちる結果になっていると思われる (図 25 参照)。

カルノーサイクルの熱効率は、

$$\eta_c = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \dots \dots (式 1)$$

η_c : カルノーサイクルの熱効率

T_1 : 高温側 : 出口温度[K]

T_2 : 低温側 : 海水温度 (約 300[K] = 27[°C])

図 25 はカルノーサイクルの熱効率の式 1 に低温側:海水温度 T_2 の値を変化させて (300[K]、325[K]、350[K]、375[K]) 代入した際の熱効率の上限の理論値である。

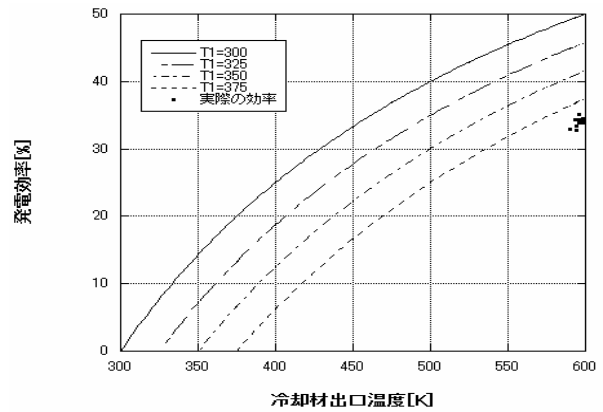


図 25 熱効率対冷却材出口温度
(カルノーサイクル理論値) (PWR/BWR/ABWR)

図 26 は PWR と BWR の熱効率を示したものである。こうしてみると、どちらも熱出力に熱効率は関わらないということが分かる。

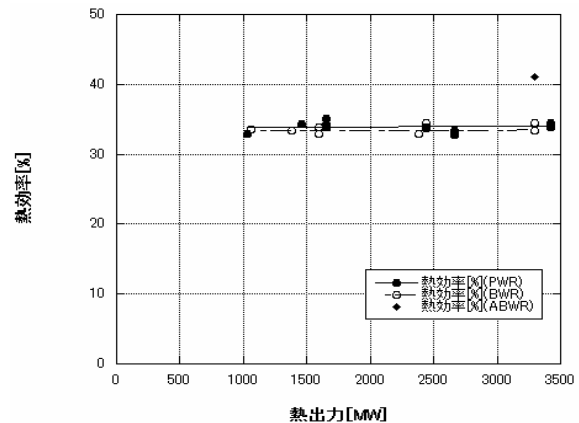


図 26 熱効率対熱出力 (PWR/BWR/ABWR)

●PWR : $y = -0.00008x + 34.24$
 $R^2 = 0.0097$

○BWR : $y = 0.0006x + 32.327$
 $R^2 = 0.0548$

図 26 の BWR のデータで 1 つだけ外れた値があるが、それは BWR の改良型である改良加圧水型軽水炉 (APWR) のデータである。BWR だけに限定すれば図 3 の発電効率と同じになる。

蒸気タービンでのランキンサイクルの理論熱効率

カルノーサイクルでは湿り蒸気からの断熱圧縮という実現困難な部分が存在する。ランキンサイクルはその部分を除いている [7,9]。例えば、

- ① 蒸気タービンから排気を復水して飽和水にする。
- ② 給水ポンプでその水を断熱圧縮する。
- ③ 等圧のまま蒸気タービン入口温度に達するまで加熱する。

といった過程を繰り返している。今回は、原子力発電所での蒸気タービンの効率をランキンサイクルで示してみる。そのためにいくつかの仮定を行う。

- ① 復水した後の飽和水の温度を 20[°C]、圧力を 1[atm] (大気圧) とする。
- ② 吸水ポンプで BWR では 67[atm]、PWR では 58[atm] に加圧するとする。
- ③ 蒸気タービンの入口温度を BWR では 283[°C]、PWR では 273[°C] とする。

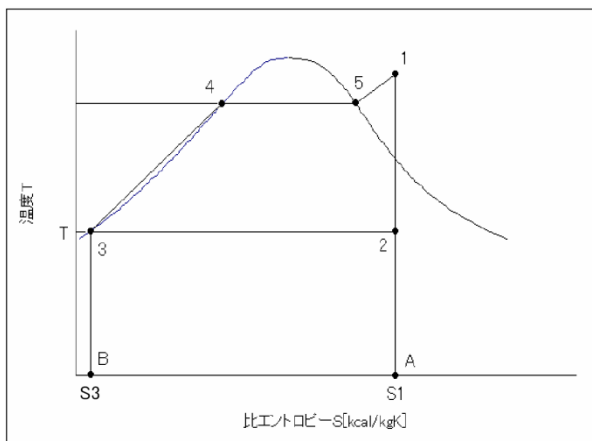


図 27 ランキンサイクル概略図 (T-S線図)

これから効率を求める。
 最初に BWR の場合を考える。このランキンサイクル全体に投入する熱量を Q_1 、放熱量を Q_2 、蒸気タービン入口 (図 27 の点 1 の状態) での比エンタルピーを h_1 、比エントロピーを S_1 、給水ポンプ (図の点 3 の状態) での比エン

タルピーを h_3 、比エントロピーを S_3 とする。以下の関係が成り立つ。

$$q_1 = h_1 - h_3$$

$$\Delta S = S_1 - S_3$$

$$q_2 = T \Delta S \quad (\text{ここでの } T \text{ は } 20[^\circ\text{C}])$$

$$\eta = \frac{q_1 - q_2}{q_1}$$

ここで q_1 は図の面積 1AB345 を示し、 q_2 は図の面積 2AB3 を示している。つまり面積が熱量を表している。

よって $q_1 = h_1 - h_3 = \text{面積 } 1AB345$ という関係がある。
 後はこれに分かっているデータと蒸気表 [5] (日本機化学会: 蒸気表 1968 丸善) に基づき、 h_1 、 h_3 、 S_1 、 S_3 を代入し計算した。まず、蒸気表 [10] で 67[atm] でのデータを探す。もしも無い場合はその間のデータから推定する。そこから、20[°C]、283[°C] での比エンタルピー h_3 、 h_1 を q_1 の式に代入すると、 $q_1 = 2687 [\text{kJ/kg}]$ を得た。

また、蒸気タービン入口とそこからの排気では比エントロピー S は等しいので、 S_1 は圧力 67[atm]、温度 283[°C] での値を用いた。 S_3 は圧力 1[atm]、温度 20[°C] での値を用いて計算すると、 $\Delta S = 5.55 [\text{kJ/kgK}]$ を得た。これから、 $q_2 = 1627 [\text{kJ/kg}]$ が求められ、その効率は

$$\eta = \frac{2687 - 1627}{2687} = 0.394 = 39.4\%$$

という結果になった。

これは PWR に関しても圧力・温度を変えれば、同様に求められる。その結果 PWR での効率は 38.9% という結果となった。

ここで注意して頂きたいのは、蒸気タービン内での効率を示しているのであって、この結果だけではどちらの炉型の方が効率が良いとは言えない。

(2) 冷却材流量

冷却材とは、原子炉中で起こる核分裂による熱を吸収し、炉の熱を冷ます (炉心熔融を防ぐ) 役割を果たす流体のことである。

図 28 と上記の説明から分かるように、炉の発熱量が高くなれば、それに伴って冷却材は多く必要とされる。

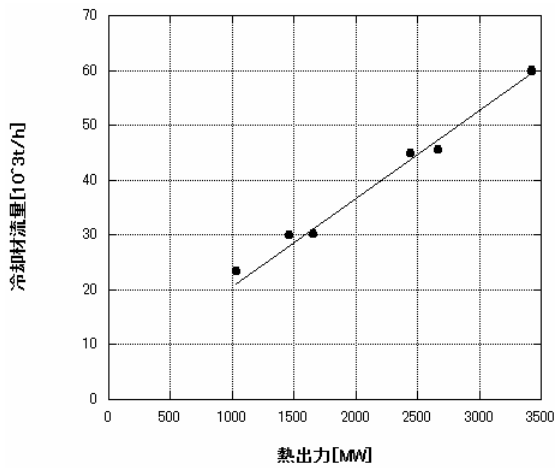


図 28 冷却材流量対熱出力 (PWR)
 $y = 0.0161x + 4.5026 \quad R^2 : 0.9909$

(3) 全ウラン装荷量

軽水炉の燃料はウランである。よって、より多くの熱出力を得ようとすれば、必然的にウランの量も多くなる。

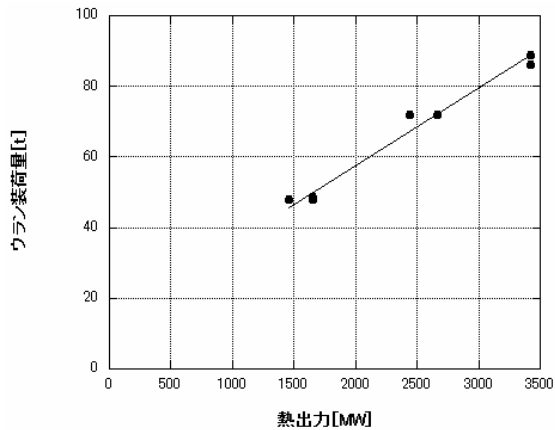


図 29 全ウラン装荷量対熱出力 (PWR)
 $y = 0.0216x + 14.654 \quad R^2 = 0.9817$

(4) 平均熱流速

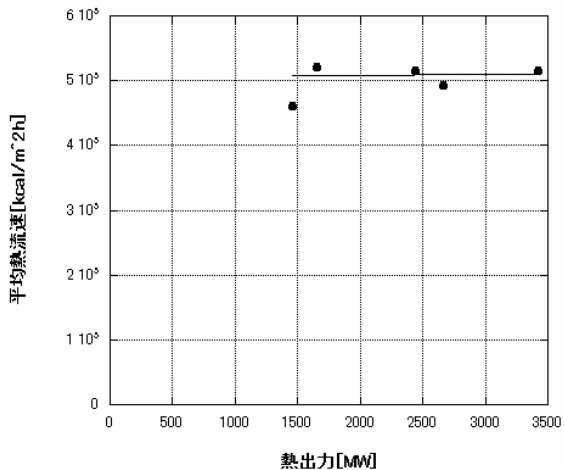


図 30 平均熱流速対熱出力 (PWR)

$y = 1.203x + 505987 \quad R^2 = 0.0033$

原子力発電プラントでは、熱出力が増加するに伴って、燃料棒、冷却水量が増加する。よって、平均熱流速は一定となる。

(5) 冷却材出入口温度

炉を冷やすための冷却材の温度は、ほぼ一定であることが図 10 より分かる。ただし、熱出力が大きくなれば取り出される熱も大きくなってしまふ。よって、冷却材の流量を増やすという方法をとっている。(図 7 も併せて参照)

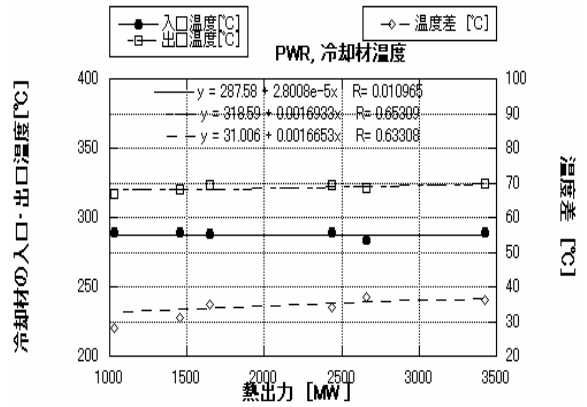


図 31 冷却材出入口温度/出入口温度差対熱出力 (PWR)

入口温度: $y = 287.58 + 2.8008e-5x \quad R^2 = 0.010965$

出口温度: $y = 318.59 + 0.0016933x \quad R^2 = 0.65309$

温度差: $y = 31.006 + 0.0016653x \quad R^2 = 0.63308$

図 32 は、熱出力と炉心の高さ、炉心の直径の関係をとって見た。

炉心の高さは、3.66[m]と一定である。ただし、熱出力 1000[MW]付近の一つ 3.66[m]から外れた高さがあるが、これは美浜 1 号のもので、初期に建設されたものであるから、無視して考える。

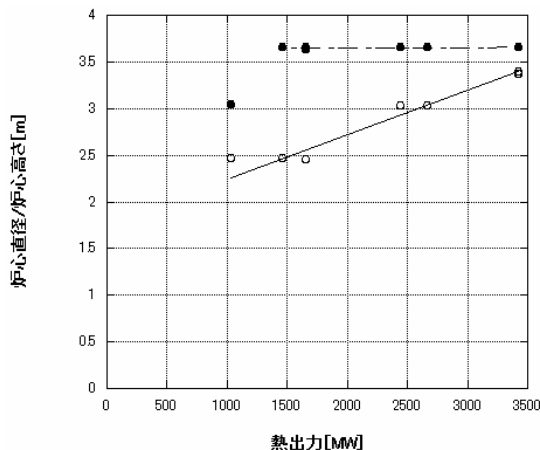


図 32 炉心高さ／炉心直径対熱出力 (PWR)

●炉心高さ : $y = 3.6503$ $R^2 = 0.1526$
 ○炉心直径 : $y = 0.0005x + 1.76$ $R^2 = 0.9578$

炉心高さ 3.66[m]は一見中途半端な数字に見えるが、日本が原子炉建設の手本とした欧米では、3.66[m]=12[feet]である。よって、この数字は単に手本にした国のものをそのままメートル単位に直しただけのものである。

また、炉心の高さを変えないということは、直径を大きくしていかないことには、装荷できるウラン量を増やせないのだから、極端に大きな熱出力を得ることはできない。高さを出力に応じて高くできないのは、燃料集合体の交換作業の利便性と、炉心設計の単純化(合理化)のためではないかと思う。

(6) タービン蒸気流量

熱出力が上がれば、それに伴って炉の温度も上がる。ただし、上げたままにするとメルトダウン(炉心溶融)を起こすので、冷却材が多く必要となる。蒸気も多く発生する(図 33)。図 31 でも述べたが、熱出力がかわっても冷却材の温度はほとんど変化させない設計になっている。

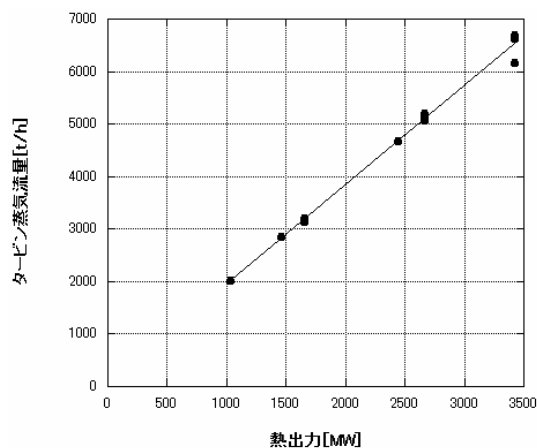


図 33 タービン蒸気流量対熱出力 (PWR)

$$y = 1.8917x + 71.512 \quad R^2 = 0.9919$$

3.2.2 熱出力との直線関係はあるが、他の要素も絡んできているもの

(1) 燃料集合体個数

ここまで PWR におけるパラメータを見てきたが、この燃料集合体個数に関しては比較のために BWR についても考察する。

燃料集合体とは、原子炉の燃料であるウランペレット(ウランを小さな円筒状に焼結したもの)を連ねた燃料要素と呼ばれるものをいくつか集めて束のようにしたものである。原子炉は燃料集合体をいくつも並べる。

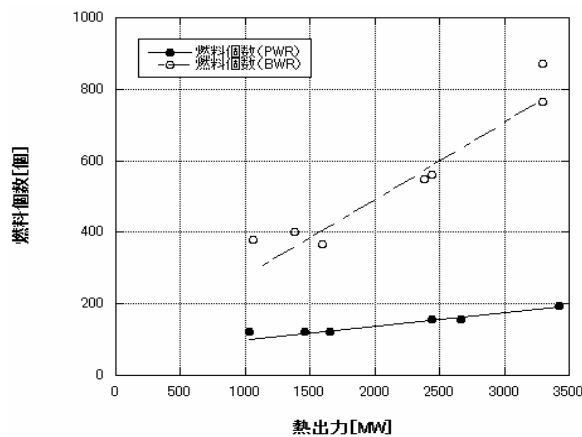


図 34 燃料集合体個数対熱出力 (PWR/BWR)

●PWR : $y = 0.037x + 68.803$ $R^2 = 0.9654$
 ○BWR : $y = 0.222x + 40.905$ $R^2 = 0.95986$

図 34 より、燃料集合体個数は同じ熱出力に対し BWR の方が PWR より多い。これは、日本の PWR は燃料集合体での燃料要素の配列が 14×14 や、15×15、17×17 の配列で並ぶ 3 種類の配列方法があるのに対して、日本の BWR には基本的に 8×8 の配列方法しかない(一部 7×7、9×9 もあるが)からである。PWR は 1 つの燃料集合体に多くの本数の燃料要素(ウランペレットを積み重ねたもの)を収納できるのに対して、BWR は PWR ほどには燃料要素を収納することができない。そのため、BWR が PWR と同じだけの出力を得ようとする、燃料集合体の本数は多く必要になる。

BWR が PWR と同じだけの出力を得ようとする、燃料集合体の本数は多く必要になる。しかし、燃料要素(燃料棒)の本数で比べた場合は、両者の本数は接近するのではないかと思い、図 35 に燃料要素本数対熱出力の関係を作図してみた。

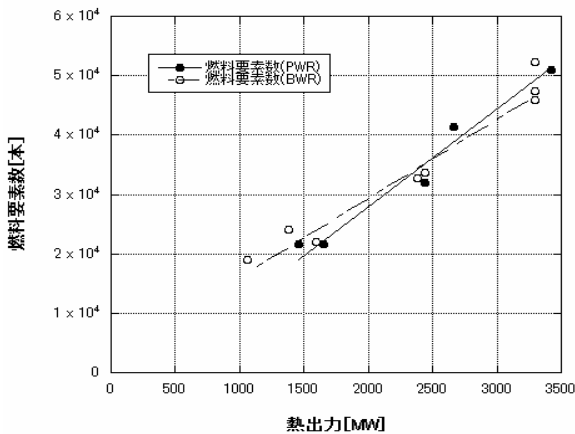


図 35 燃料要素数対熱出力 (PWR/BWR/ABWR)

● : $y=16.449x-4932$ $R^2=0.9765$
 ○ : $y=13.324x+2510.9$ $R^2=0.9584$

図 34 では、PWR と BWR で燃料集合体個数は大差があるが、図 35 の燃料要素本数で比べると両者の差はほとんどなくなっている。PWR と BWR の燃料ペレットの直径は 10%ほど異なる。

表 7 燃料要素配列とペレット直径 (TD=理論密度)

炉型	燃料要素配列	ペレット直径	ペレット密度
PWR	14×14	0.93cm	93%TD
	15×15	0.93cm	
	17×17	0.82cm	95%TD
BWR	7×7		
	8×8	1.04cm	97%TD
	9×9A	1.12cm	97%TD
	9×9B	1.10cm	97%TD

熱出力と燃料ペレットの断面積の関係を以下の図 36、37 に示す。

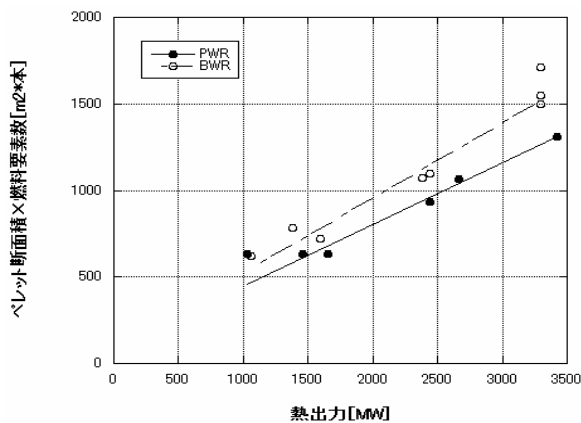


図 36 燃料要素数×ペレット断面積対熱出力 (PWR/BWR/ABWR)

●PWR : $y=0.3559x+92.165$ $R^2=0.9721$
 ○BWR : $y=0.4353x+82.003$ $R^2=0.9584$

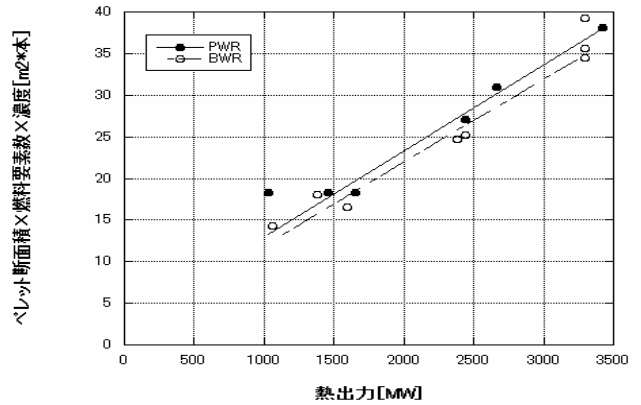


図 37 燃料要素数×断面積×濃縮度対熱出力 (PWR/BWR)
 濃縮度 PWR : 2.9[%] / BWR : 2.3[%]

●PWR : $y=0.0107x+2.7646$ $R^2=0.9721$
 ○BWR : $y=0.0131x+2.4616$ $R^2=0.9584$

図 35 でほぼ重なっていた PWR と BWR の燃料要素数は、ペレットの断面積も考えると、かえって差が広がってしまった (図 36)。そこで、PWR にはウラン濃縮度 (初装荷分) 2.9[%]、BWR には 2.3[%] を掛けてみた。すると、図 37 にあるように、PWR と BWR の直線はほぼ重なった。

よって、PWR、BWR の二つの炉型は本質的には同じ規則で設計されているのではないと思われる。

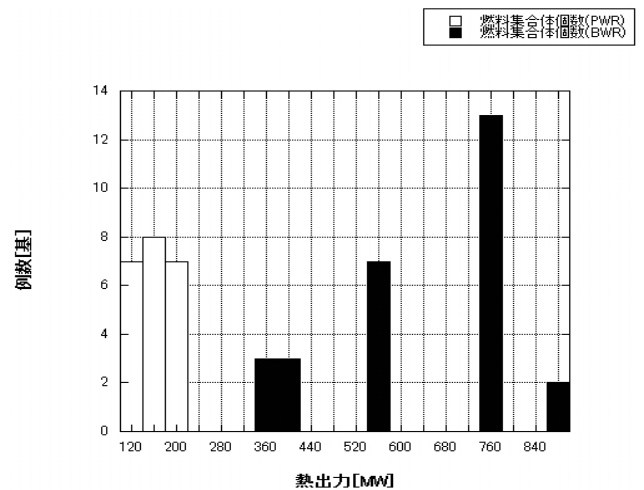


図 38 燃料集合体個数対例数 (PWR/BWR)

PWR には燃料要素の配列規則が 3 種類ある。14×14、15×15、17×17 である。それぞれに対応して燃料集合体個数は 121 個、157 個、193 個となっている (図 38 の PWR 参照)。燃料集合体個数は型が大きくなる毎に 36 個増えている。

1本の燃料集合体あたりの平均熱出力、および1本の燃料要素あたりの平均熱出力の炉の熱出力との関係を次の図39にそれぞれ示す。PWRでは、炉の形式ごとに出力密度の設計が異なる。一方、BWRの設計では炉心の設計時、1種類の出力密度の燃料要素、燃料集合体を必要な本数だけ並べる簡単（合理化された）設計になっている。

PWRについては、燃料集合体内の燃料要素の本数は、14×14配列と15×15配列を比べると15×15配列の方が36個多く、同様に17×17配列の方が15×15配列よりも36本多い。燃料要素本数は、等差数列で表される。燃料集合体の本数Nは、 $N = 121 + 36 \cdot m$ (m=1, 2, 3, 自然数) で表される。

BWRの場合は、歴史的には7×7配列があり、また改良型BWR(ABWR)では9×9配列が採用されているが、日本のBWRではほぼ全原子炉が8×8配列である。一方、日本のPWRの場合は、14×14、15×15、17×17の配列ごとに、ペレット直径、ペレット高さ、焼結体の密度、U-235の濃縮度等が異なり、熱出力と集合体本数の関係は単純ではない。ペレット直径の違いはあるが、燃料要素本数と熱出力の関係のほうが燃料集合体本数と熱出力の関係より単純だと思われる。次の図39に、PWRとBWRの燃料集合体数の偶奇性と熱出力の関係を示す。

PWRというより、WH社の設計ルールでは、 $4n+1$

BWRというより、GE社の設計ルールでは、 $4n$

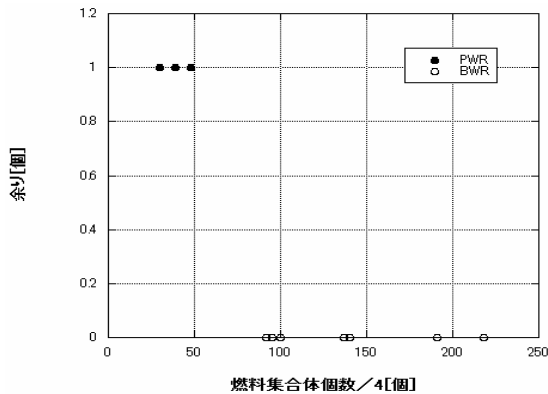


図39 燃料集合体個数/4の余り (PWR/BWR)

3.2.3 熱出力とは無関係に、他の要素（規則性）によって決定されているもの

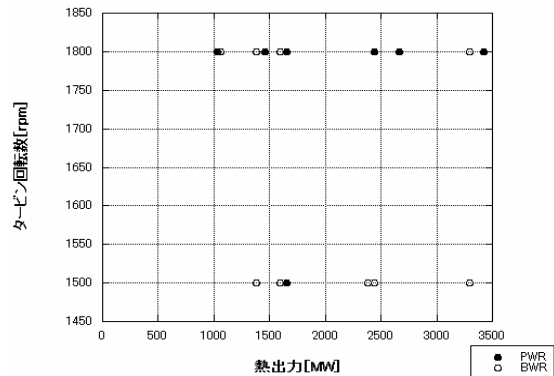


図40 タービン回転数対出力 (PWR/BWR)

給電地域:関東以北: 1500 [rpm]

関西以南: 1800 [rpm]

タービン回転数に関しては、PWRやBWRというような炉型による区別が必要がないため、1つのグラフにまとめることにした。

タービンの回転数は、これまでに挙げたパラメータとは違い、図40からも分かるように熱出力との関連性が見られない。ここで注目したのは、各発電所の給電地している地域である。

周波数 50[Hz]の場合：1500[rpm] (東日本)

周波数 60[Hz]の場合：1800[rpm] (西日本)

また、一般的に1分あたりの回転数は、

$$\text{回転数[rpm]} = \text{周波数[Hz]} \times 60[\text{s}]$$

で求められる。その考え方で行くと、東日本にある原子炉のタービンの回転数は毎分3000回転（毎秒50回転）であるし、西日本にある原子炉のタービンの回転数は毎分3600回転（毎秒60回転）である。だが、実際の原子炉は一般的に考えられる回転数の半分の回転しかしない。これは、原子炉があまり温度を上げられないために蒸気の質が悪く、動翼が長いために、遠心力緩和を考えなければならず、火力発電の半分の回転数になっている。発電機の電極数を倍にして50Hzおよび60Hzの電気の発電を行っている。

4. まとめ

原子力発電プラントにおいて、熱出力と各種パラメータはおおよそ比例関係、定数、または無関係に分けることができる。ただし、炉の形式によってこれらの関係が異なる。

5. プログラミング

2009年夏の第20回全国高専プログラミングコンテストに「脳原子炉『my原子炉』」と題して学校代表として出場した。成績は敢闘賞であった。

原子炉の各パラメータの値や材質など(80項目の原子炉諸元)を、任意の熱出力・炉型(PWR/BWR)・交流周波数(50Hz/60Hz)の僅か3項目の入力データから算出するというプログラムを、10進BASIC[12]により記述した。

IV. 謝辞

私達の興味を実験課題(八光熱実験コンテスト)に採択していただきました八光社に感謝いたします。

原子炉シミュレータ(JRR-1)の実習をさせていただいたJAEA原子力研修所の方々、貴重な体験をありがとうございました。

わたしたちのプログラムに[5]、[6]の数値データの使用を許可していただきました原子力文化振興財団およびJAIFの方々に感謝いたします。

PWR(玄海原子力発電所)を見学させていただいた九州電力の方々、BWR(福島原子力発電所)を見学させていただいた東京電力の方々、ありがとうございました。

(仮称)十進BASICを製作されました白石和夫先生にも、感謝しております。

V. 参考文献

- [1] 岩波 理化学事典 第四版 p.942、発行者 安江良介 岩波書店
- [2] 日本機械学会 蒸気表 p.7 表 I-2、発行者 田中實 日本機械学会 1968年刊行
- [3] 八光社のホームページ
<http://www.hakko.co.jp/qa/qakit/html/h01070.htm>
- [4] 理科年表 2008、国立天文台
- [5] 世界の原子力発電の開発の動向 2009年版—2009年1月1日現在—、日本原子力産業協会、2009。
- [6] 原子力の基礎講座 3、「原子力発電」、財団法人日本原子力文化振興財団発行、平成8年改定第5版
- [7] 藤家洋一、「原子力—自然に学び、自然を真似る—」、2005、ERC出版。
- [8] 世界の原子力発電の開発の動向 2007/2008年版—2008年1月1日現在—、日本原子力産業協会、2008。
- [9] 斉藤武、大竹一友、三田地紘史「工業熱力学通論」日刊工業新聞社、(1983)。(機械科の熱力の教科書)
- [10] 日本機会学会：蒸気表 1968 丸善
- [11] 白石和夫、Windows95で動作する Full BASIC 言語処理系、
- [12] 木村良夫、パソコンを遊ぶ簡単プログラミング、コンピュータを自由に操る「十進 BASIC」入門、講談社刊(2003)。