

# 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

茨城工業高等専門学校 ラジオ部

## 1. はじめに

我が茨城工業高等専門学校の周りには、半径10km以内に東海第二原子力発電所を始め16もの原子力関係事業所がある。(図1)



図1 我が校周辺の原子力関係事業所、半径10km

そのため、ラジオ部ではこれまでに、平時における自然放射線の強度の測定[1,2]や、発電用原子炉の高経年化を考慮した日本および米国の原子力発電の設備容量の近未来予測の試算[3]などを行ってきた。また昨年度は、文部科学省原子力人材育成プログラムに採択されたことにより、日本初の原子炉である JRR-1 の原子炉シミュレーターの運転実習を行った。(図2参照)

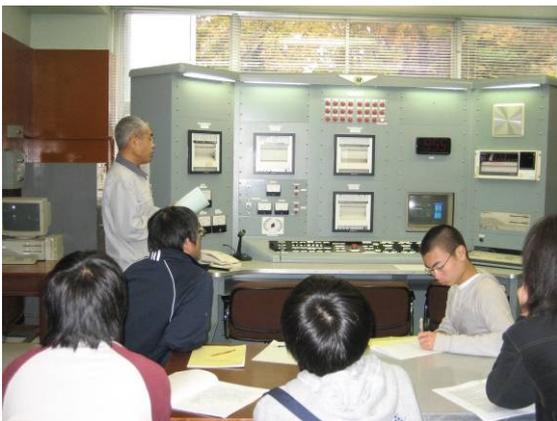


図2 JRR-1原子炉シミュレーターの運転実習 (H20.01)

これらの活動を通して、実際に原子炉の中ではどのような現象が起こっているのか、どのような温度変化が起きているのかなど様々な疑問が浮かんだ。調べようとしたが、世間の原子力発電や原子炉の説明は難しすぎる[4,5]か、逆にあまりにも定性的[6,7]で、量の概念が無いのか、計算途中を省いた結論のみで「信じる」か「信じない」かしか

対応ができない宗教のように感じられる。

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模擬実験で理解しながら、原子炉シミュレーターの試作をすることにした。

## 2. 原子力発電所から生じる熱出力量の算出

まず、原子炉内でどれくらいの熱が生じているのかを知るために原子力発電所から一年間にどれくらい熱が生じているか調べた。

### 2.1 方法

原子力発電所からの電気出力量を  $Q_e$ 、熱出力量を  $Q_t$ 、電気出力量から熱出力量に変換するときの変換効率を  $\eta$  とすると

$$\eta = Q_e / Q_t$$

$$\therefore Q_t = Q_e / \eta$$

となり、原子力発電所から一年間に生じる熱出力量を求めることができる。 $Q_e$ 、 $Q_t$ 、 $\eta$  は[6]、[9]より用いた。

### 2.2. 結果・考察

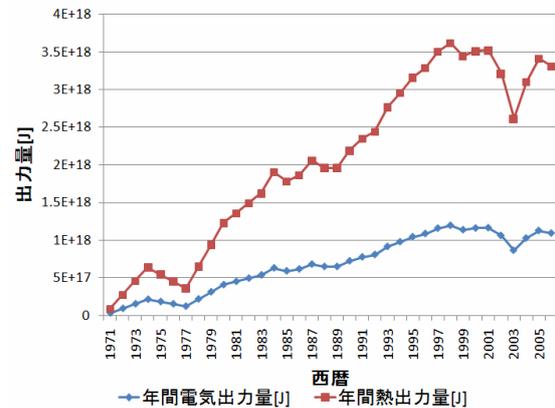


図3 原子力発電所から出力される電力量と熱量の変化

算出の結果、図3のようになった。電気出力量と熱出力量は同じ変化をしている。これは、熱出力量が電気出力量に定数を掛けられているからである。

熱出力量は膨大であるが、電気出力量は熱出力量の3分の1である。残りの3分の2は運転時に放出しているが、これも膨大な量である。そこで、原子力発電所の運転に必要な冷却水の量を算出してみることにした。

### 3. 原子力発電所の運転に必要な冷却水の算出

次に、原子炉を運転する際に必要な冷却水を知り、理解するため、原子力発電所の運転に必要な冷却水の算出を行った。

#### 3.1. 方法

原子力発電所からの電気出力量を  $Q_e$ 、熱出力量を  $Q_t$  とすると、冷却すべき熱量  $Q_t'$  は

$$Q_t = Q_e + Q_t'$$

$$\therefore Q_t' = Q_t - Q_e \dots \textcircled{1}$$

冷却水の比熱を  $c$ 、冷却水の温度差を  $\Delta t$  とすると、冷却水の質量を  $m$  は①より

$$Q_t' = m * c * \Delta t$$

$$m = Q_t' / (c * \Delta t)$$

$$\therefore m = (Q_t - Q_e) / (c * \Delta t)$$

となり、原子力発電所の運転に必要な冷却水の算出ができる。 $Q_e$ 、 $Q_t$ 、 $c$ 、 $\Delta t$  は[6]、[9]、[10]より用いた。

#### 3.2. 結果・考察

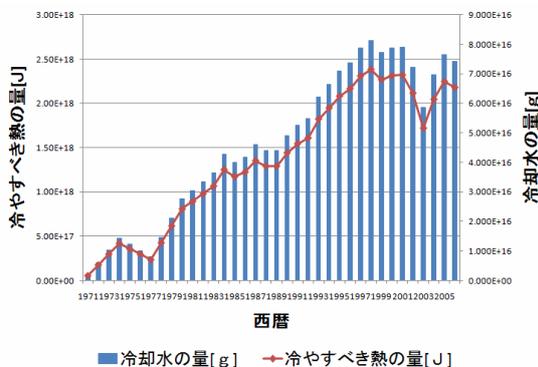


図4 原子力発電所の運転時に冷却すべき熱量と冷却水の量の変化

算出の結果、図4のようになった。原子力発電所の運転時に冷却すべき熱量と冷却水の量の変化は、同じ変化をしている。これは、冷却水の量が冷却すべき熱量に定数を掛けているだけだからである。

冷却水の量は膨大であり、検討見当がつかないため、利根川と信濃川の本数に換算してみた。図5はその結果である。

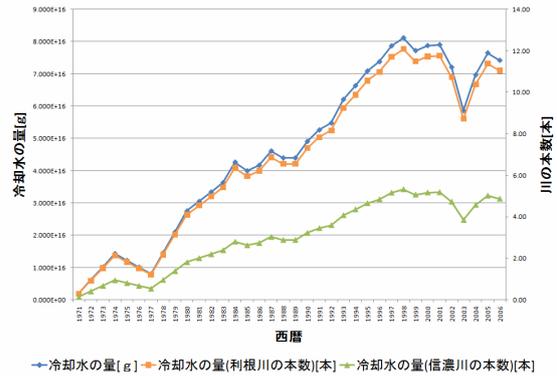


図5 原子力発電所の運転に必要な冷却水の量と川の本数に換算した冷却水の量

2006年では利根川なら11.04本、信濃川なら4.87本必要であった。また、一番冷却水の量が必要であった1998年の場合、利根川12.08本分、信濃川5.33本分という結果になった。これより、原子力発電所では、膨大な冷却水が必要である。

そこで、内陸国の原子力発電所はどのように冷却しているのか調べてみると、エアコンの室外機を大型化した「クーリングタワー」を使用していた。これには、電気代がかかる。

これらのことから、島国である日本は海水をそのまま原子炉の冷却水として使用できるので、有利といえるだろう（英国の原子力発電所も同じ）。

### 4. 原子力発電所を運転するのに必要な核燃料の算出

次に、ウラン235の1原子が核分裂する際に約200MeVの熱エネルギーが生じることを利用して、原子力発電所の運転に必要な核燃料廃棄物の量を調べた。

#### 4.1. 方法

原子力発電所の1年間の発電電力量を  $Q_e$ 、熱エネルギーから電気エネルギーに変換する際の変換効率をとすると原子力発電所にて1年間に発生した熱量  $Q_t$  は

$$Q_t = Q_e / \eta \dots \textcircled{1}$$

U-235原子が一回核分裂する際に生じるエネルギーを  $Q_0$  とすると

$$Q_0 = 200 [\text{MeV}/\text{個}]$$

$$= 2 * 10^8 * 1.6022 * 10^{-19} [\text{J}/\text{個}]$$

原子力発電所にて発生した熱量は  $Q$  であるから核分裂したU-235原子の個数  $N$  は①より

$$N = Q_t / Q_0 [\text{個}]$$

$$=Q_e / (\eta * Q_0) \text{ [個]} \dots \textcircled{2}$$

U-235 の原子量を U235 とすると  
 $U235=235 \text{ [g/mol]}$

アボガドロ定数を  $N_0$  とすると  
 $N_0=6.02 \times 10^{23} \text{ [個/mol]}$

U-235 の質量 MU235 は②より  
 $MU235=N * U235 / N_0$   
 $= (Q_e * U235) / (\eta * Q_0 * N_0) \dots \textcircled{3}$

U-235 の濃縮度を Y とすると核燃料の質量 M は  
 ②より

$$M = MU235 / X$$

$$= (Q_e * U235) / (\eta * Q_0 * N_0 * Y)$$

今回の調査ではウラン 235 の 1 原子が核分裂する際に 200MeV の熱エネルギーが生じ、一度核分裂した核燃料は再度核分裂しないとした。また、文献にて変換効率、濃縮度を調べてみたところ国内のどの発電所も変換効率 33% 程度、濃縮度 3% 程度であったため変換効率 33%、濃縮度 3% とした。データは [7]、[8] を用いた。

## 4.2. 結果・考察

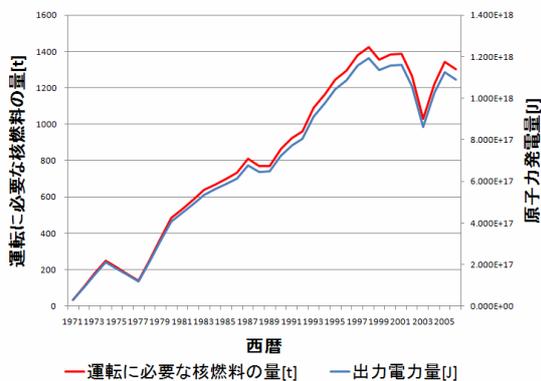


図 6 原子力発電所からの出力電力量と運転に必要な核燃料の量

算出の結果、図 5 のようになった。原子力発電所からの出力電力量と運転に必要な核燃料の量は、同じ変化をしている。これは、核燃料の量が原子力発電所からの出力電力量に定数を掛けているだけだからである。

核燃料の量は、2006 年において 1300t ほどであり、最大量の 1998 年では 1400t ほどと膨大な量である。しかし、これらだけで日本の原子力発電所を運転できていることを考えたら、膨大ではなくむしろ少なくすんでいるといえるだろう。

## 5. 今後の課題

今回の研究では原子炉のシミュレーションを一年単位で行ったが、それより短い期間については調査活動において、なかなか理解できず、当初の計画までに至らなかった。現在、JAEA 研修センターの方や東京大学の原子力専攻の先生方の講演会を通して、理解を深めているところである。



図 7 東京大学大学院工学系研究科原子力専攻教授 小佐敏荘先生による講演会

今後は、より短い時間に原子炉内ではどうなことが起きているのか理解し、簡易的である JRR-1 の原子炉でシミュレーションを行いたい。そして、弥生（東大）、NSRR, TRACY(JAEA), 近大炉等の小型の研究用原子炉のシミュレーションを試み、最後に 100 万 kW 級の大型発電用原子炉（動力炉）の BWR, PWR に挑戦したらと思っている。

### 5.1. 冷却水を使用しない場合の原子炉のシミュレーション（自然冷却）(1/30~1/100 スケール)

まず、平常時の水温を基に核分裂反応による発熱量をコンピュータにより計算し、その発熱量分をヒーターにより炉内の水を加熱し、水温を計測する(図 3)。つぎに、先程加熱した水の水温を基に核分裂反応による発熱量をもとめ、同様に加熱し水温を計測する。

このような一連の動作をある一定の時間ごとに行い、原子炉内の水温変化、熱伝導、核分裂反応の変化などを調べる。

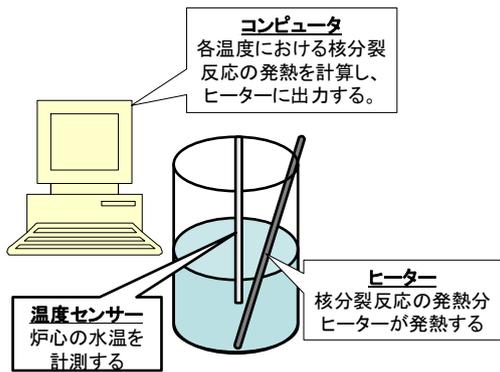


図3 JRR-1原子炉のモデル(ウランの硝酸溶液燃料をピーカーと水とヒーターで構成する)

### 5.2. 冷却水を使用する場合の原子炉のシミュレーション、強制冷却機能つきの場合、(1/30~1/100スケール)

5.1.と同様に、平常時の水温を基に核分裂反応による発熱量をコンピュータにより計算し、その発熱量分をヒーターにより炉内の水を加熱し、水温を計測する(図4)。その際、一定量の冷却水を流す。つぎに、先程加熱した水の水温を基に核分裂反応による発熱量をもとめ、同様に加熱し水温を計測する。

このような一連の動作をある一定の時間ごとに行い、原子炉内の水温変化、熱伝導、核分裂反応の変化などを調べる。

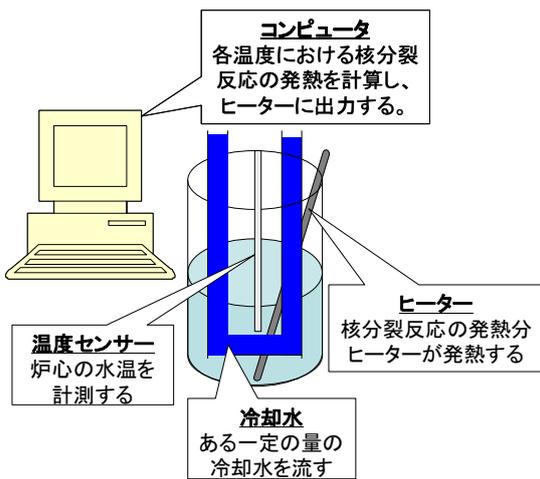


図4 JRR-1原子炉に冷却水を流した場合の原子炉をピーカー+水+電気ヒーターで模擬するモデル

### 5.3. 原子力発電所のシミュレーション(沸騰水型原子炉 BWR) (1/100 万スケール)

5.1.と同様に、各温度における核分裂反応による

発熱量をコンピュータにより計算し、その発熱量分ヒーターにより炉内の水を加熱する(図5)。加熱された水は水蒸気となりタービンを回して発電する。そして、水蒸気は冷やされ、液体になり炉内へ戻る。その際、発電量、炉心・炉出口・炉入口の温度を調べる。

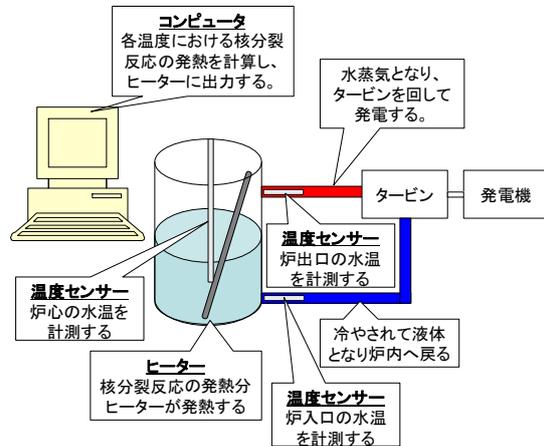


図5 発電用原子炉、沸騰水型 (BWR) のモデル

### 5.4. 原子力発電所のシミュレーション(加圧水型原子炉 BWR) (1/100 万スケール)

炉内の現象は5.4.と同様である(図6)。炉からでた水蒸気は、容器に入っている別の水を温め、冷やされることで液体になり炉内へ戻る。

容器に入っている水は、温められて水蒸気となり、タービンを回して発電する。そして、水蒸気は冷やされ、液体になり容器内へ戻る。その際、発電量、炉心・炉出口・炉入口・容器中心・容器出口・容器入口の温度を調べる。

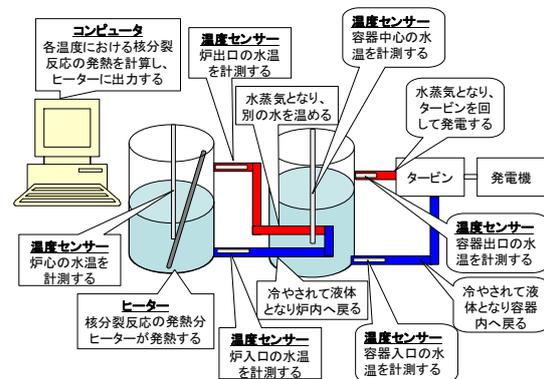


図6 発電用原子炉、加圧水型 (PWR) のモデル

### 参考文献

[1] 松沢ほか、身のまわりの放射線の測定の試行、茨城工業高等専門学校研究彙報第42号(平成19)

年) pp. 45 - 52.

[2] 松沢ほか、宇宙線の測定を目指した富士登山、茨城工業高等専門学校研究彙報第 43 号 (平成 20 年) pp. 35 - 46.

[3] 松沢ほか、原子炉の寿命を考慮した原子力発電の設備容量の将来予測と原子炉建て替えの試算、茨城工業高等専門学校研究彙報第 43 号 (平成 20 年) pp. 23 - 34.

[4] 都甲泰正・岡芳明、「大学講義シリーズ 原子工学概論」コロナ社(1987).

[5] 平川直弘、岩崎智弘、原子炉物理入門、東北大学出版会 (2003).

[6] 経済産業省資源エネルギー庁編集、原子力 2007, (財) 日本原子力文化振興財団(2007).

[7] 「原子力・エネルギー」図面集, 2007, (財) 日本原子力文化振興財団(2007).

[8] 小畑雅博・島敬二郎、JRR-1 原子炉シミュレータ、運転実習・特性測定、日本原子力研究所.

[9] 「原子力の基礎講座 3.原子力発電所」、(財) 日本原子力文化振興財団

[10] 国立天文台編理科年表 2008