

文献調査委員会

- 光弾性実験法による鉄筋コンクリート内の応力  
・ひずみ解析 Proc. of A.S.C.E., ST/松本 徳久  
くり返し荷重を受けたプレストレストばりのひび  
われ抵抗性  
コンクリートおよび鉄筋コンクリート(ソ連)/  
星笠 正明
- 乱流境界層内のせん断力の直接測定法  
Jour. of Fluid Mechanics/渡辺 晃  
一次元流れにおけるセイシュ運動  
Jour. of Marine Research/木原 力  
熔融塩増殖炉  
Nuclear Engineering International/田中 協一

光弾性実験法による鉄筋コンクリート  
内の応力・ひずみ解析

“Stresses and Strains in Reinforced Concrete”  
Durelli, A.J., Parks, V.J.  
and Fu-pen Chiang  
Proc. of A.S.C.E., ST., Vol. 95, No. 5,  
pp. 871~887, May (1969)

近年、相異なる物質をそれぞれの特性を生じてひとつの構造材料として結合したものがひろく使われるようになった。これらの複合材料のなかで、例えばガラスファイバー、セラミックコーティングなどが注目され、研究が進んでいるが、本論文では、これ等の手法を応用し、鉄筋コンクリート中の応力とひずみを光弾性実験法により解析した。

鉄筋コンクリート中の応力解析、特に鉄筋とコンクリートの境界面のそれを光弾性法を用いて測定するうえで大きな困難は主として次の3点であり、それぞれ解決のために工夫をした。

(1) 三次元光弾性材料として通常エポキシ樹脂が使われているが、複合材料の実験において、例えばハイゾル 4290 を鋼やアルミニウムのような材料の上に注型すると、焼なましの過程で温度降下による収縮率の差から模型は壊れてしまう。そこで Sampson のエポキシ樹脂を使用した。これはハイゾル 4290 に比べて、焼なまし温度が低く、収縮係数も小さいので、自然収縮量は 0.9% ですむ。

(2) 第二の困難は、複合構造模型をスライスするとき、そう入されている鉄筋に当る硬い材料とのこぎりの摩擦熱により、凍結させた光弾性縞模様を消してしまう

点にあった。しかしその硬い材料としてハイゾル 4290、コンクリート材料として Sampson のエポキシ樹脂を使えばこの難点を避けられることがわかった。

(3) 以上の2点については新しい手法を採用して解決できたが、もうひとつ、異質材料間の収縮率の差により、模型にはじめから収縮差による初期ひずみが生ずるという問題が残っている。このため荷重をかけると、荷重による応力と初期応力が重合して測定され、純粋に荷重による応力のみを得ることができない。これを解決する第一の方法は、全く同一の模型を2個製作し、1個には荷重を加え、他の1個には荷重を与えず収縮ひずみのみの状態にして両者を比較し、荷重により生ずる応力を計算で出す方法である。第二の方法は、模型を1個だけですませる方法である。鉄筋の模型材料として、プレクシガラス、コンクリートの模型材料としてエポソ 828 を用い、できた模型を一度室温まで焼なまし、それから炉の中で載荷し、そして次に凍結サイクルにかけ室温まで冷すと収縮差によるひずみはかなり消せる。

次に相異なる収縮係数をもつ材料が、温度降下とともに収縮ひずみをもつ現象を考える。実際に問題となる収縮量は二つの材料間の自然収縮量の差である。エポキシ樹脂の収縮は、次の二つの過程で行なわれると考えられる。すなわち、1) 焼なまし温度から凍結温度に冷却される間、2) 凍結温度から室温まで冷却される間の二種である。エポキシ樹脂の場合 2) のガラス状領域における収縮は 1) のゴム状領域における収縮に比べてずっと小さい。したがって、凍結した縞模様はエポキシガラス状領域に入る以前のものであるという事実は重要である。

実験は3種類行なった。第一は、円柱の中に、一端が丸く一端は平らな棒を入れた模型であり、これについての解析は最もくわしくやった。第二の実験は矩形ばりに2本の棒を入れた模型によるものである。一方は荷重を

図-1 鉄筋コンクリートばりの模型図

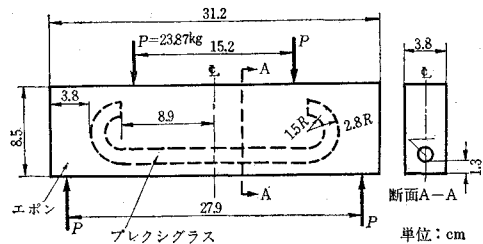


図-2 集中荷重による等色線

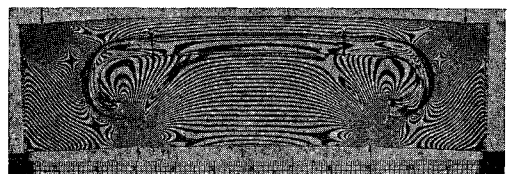


図-3 フック部における最大せん断応力

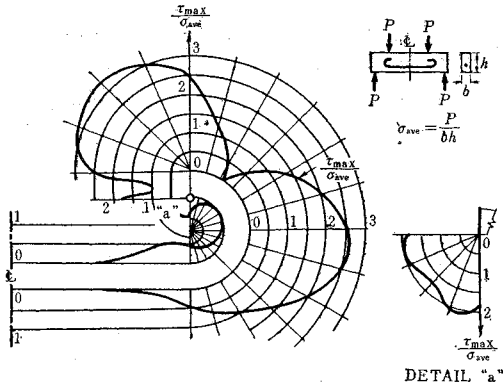
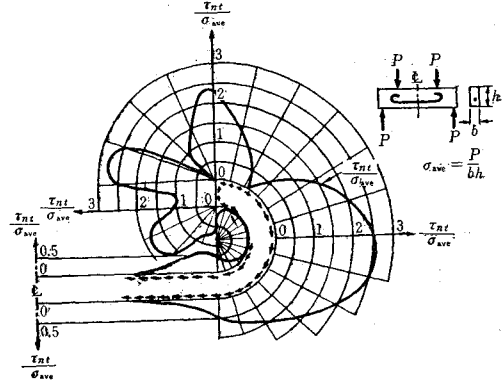


図-4 フック部における接線方向のせん断応力



与えたもの、一方は無荷重のもの2種類を比較し荷重による応力分布を求めた。第三の実験はフックの付いている鉄筋を入れた鉄筋コンクリートばりの実験である。模型材料としてコンクリート部にエポン、鉄筋部にプレキシグラスを使用した。図-2はその等色線図である。図-3は鉄筋コンクリートの境界面における最大せん断応力であり、図-4には、その接線方向のせん断応力を示した。

以上に示した鉄筋コンクリートばりの解析結果は、ここで用いた特定のヤング係数をもつ材料による結果であることに留意する必要がある。他のヤング係数をもつ複合材料について実験をするときには、別の実験材料を用いねばならない。そして、弾性範囲で微小変形を仮定した実験であり、等質等方性も仮定しているので、コンクリートのひび割れ以前の状態に対応した応力測定実験であることを付け加えておく。

(委員 松本 徳久)

### くり返し荷重を受けたプレストレスト ばりのひびわれ抵抗性

“Трещиностойкость стенок предварительно напряженных балок при работе на поперечную силу под многократно повторяющейся нагрузкой”

Троицкий, Е.А.

Бетон и железобетон

(コンクリートおよび鉄筋コンクリート)

No. 5, pp. 21~24, Май (1969)

くり返し荷重を受けたウエブのひびわれ抵抗性を研究する目的で、I型断面をした支間6mのプレストレストばり4体が試験された(図-1)。

はりのウエブには、直径10mmの丸鋼CT3 ( $\sigma_y = 3050 \text{ kg/cm}^2$ )が10cm間隔で配筋されていた。プレストレスを加えたときにはコンクリートの圧縮強度は360

図-1 試験体

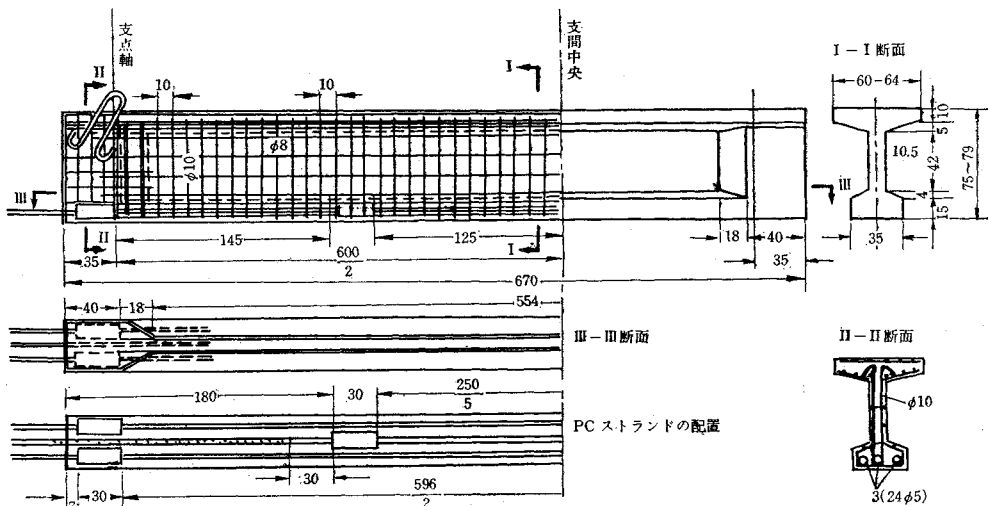


表-1 最初の斜めひびわれが生じた点におけるコンクリートの応力状態

| はり番号      | ひびわれ番 | ひびわれ号 | QTK (t) | 重心からの距離 (cm) | ひびわれ幅 (mm) | $\sigma_{\sigma_1}$ (kg/cm <sup>2</sup> ) | $\sigma_x$ (kg/cm <sup>2</sup> ) | $\tau$ (kg/cm <sup>2</sup> ) | $\sigma_{1p}$ (kg/cm <sup>2</sup> ) | $R_p^H$ (kg/cm <sup>2</sup> ) | $\frac{\sigma_{1p}}{R_p^H}$ | サイクル数 (×10 <sup>3</sup> ) |
|-----------|-------|-------|---------|--------------|------------|---|----------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| No. 1     | 1     |       | 23.29   | 3            | 0.05       | 30.5                                      | 34.8                             | 37.95                        | 24.3                                | 24.21                         | 1                           | 最初の静荷重により<br>478<br>478   |
|           | 2     |       | "       | -6.6         | 0.06       | 49.2                                      | 39.25                            | 39.5                         | 24.12                               | "                             | "                           |                           |
|           | 4     |       | 23.5    | -19.6        | 0.05       | 72.5                                      | 50.2                             | 39.5                         | 21.7                                | "                             | 0.895                       |                           |
|           | 5     |       | 23.37   | 4.4          | 0.03       | 27.8                                      | 34.7                             | 34.4                         | 21.15                               | "                             | 0.875                       |                           |
| No. 2     | 1     |       | 21.56   | 0            | 0.05       | 20.9                                      | 20.9                             | 29.7                         | 18.13                               | 25.4                          | 0.715                       | 250                       |
|           | 26    |       | 22.56   | 0            | 0.04       | 20.9                                      | 20.9                             | 31                           | 19.22                               | "                             | 0.755                       | 970                       |
| No. 3     | 1     |       | 21.21   | 3.5          | 0.02       | 32.8                                      | 38.44                            | 35.7                         | 21.28                               | 25.6                          | 0.831                       | 312+468                   |
|           | 8     |       | 22.05   | -6           | 0.03       | 53.5                                      | 40.8                             | 37.2                         | 20.9                                | "                             | 0.815                       | 312+492+280               |
|           | 11    |       | 22.2    | -21.9        | 0.03       | 78.6                                      | 41.5                             | 32.7                         | 18                                  | "                             | 0.705                       | 312+492+280               |
|           | 10    |       | 22.2    | -14          | 0.05       | 64.2                                      | 40.2                             | 36.7                         | 21.9                                | "                             | 0.755                       | 312+492+280               |
| No. 4     | 1と4   |       | 20.251  | 0            | 0.1        | 29.75                                     | 29.75                            | 33                           | 21.42                               | "                             | 0.837                       | 121と167 <sup>2</sup>      |
|           | 2と3   |       | 20.371  | -14          | 0.1        | 39.1                                      | 22.4                             | 31.7                         | 22.3                                | "                             | 0.873                       | 121 <sup>2</sup>          |
|           | 12    |       | 20.51   | -11          | 0.05       | 35.9                                      | 26.72                            | 30.8                         | 17.52                               | "                             | 0.685                       | 651                       |
| 14個の値の平均値 |       |       |         |              |            |   |                                  |                              | 20.33                               |                               | 0.802                       |                           |

QTK: ひびわれが生じた断面におけるせん断力  
 $\sigma_{\sigma_1}$ : 載荷前の軸方向圧縮応力  
 $\sigma_x$ : 軸方向圧縮応力

$\tau$ : せん断応力  
 $\sigma_{1p}$ : 引張主応力

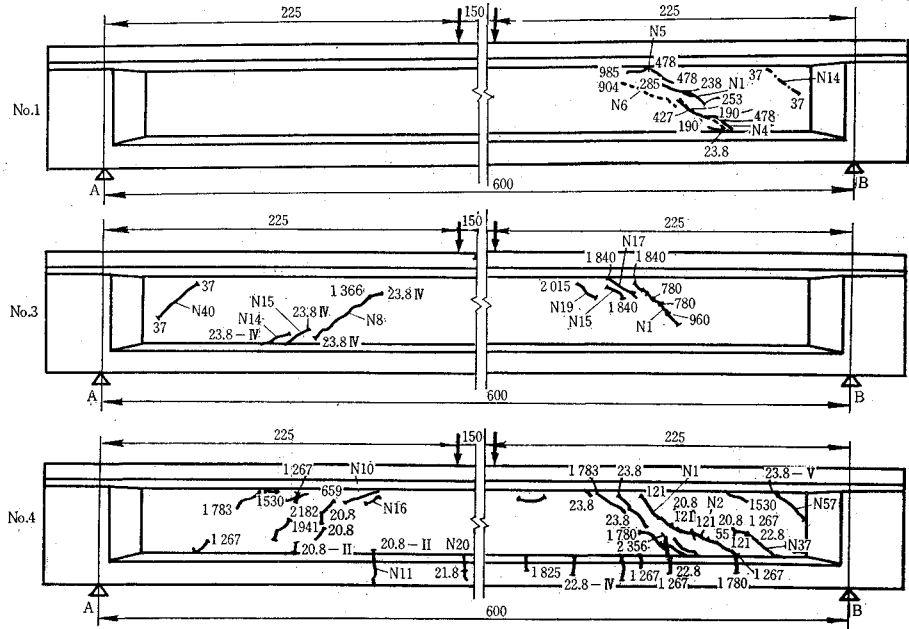
1. ひびわれが30万回以前に生じているのでせん断力は過大評価されている
2. ひびわれ幅は65サイクル直後に測定されている

kg/cm<sup>2</sup>であり、実験時には392~420 kg/cm<sup>2</sup>であった。3本のPCストランド(24φ5mm)は、支点で定着されていた。荷重は支点から2.5m離れた2つの点ではりに加えられた。

No.1 はりは、ウェブに最初の斜めひびわれが生じるまで静的に荷重を加えられた。このときコンクリートに生じている引張主応力 $\sigma_{1p}$ を静的な荷重を受けた場合のひびわれ抵抗を表わす値とする。その後、はりには

$Q=24t$ で137万回まで試験された。No.2 はりは30万回までくり返し荷重で試験され、その後荷重を1t(約4~5%増)だけ増して180万回まで試験された。No.3, No.4 のはりにはさらに180万回および202万回で荷重を1tずつ増やして258万回までくり返し試験を行った。いずれのはりも最後に静的な荷重によって破壊にいたらしめている。くり返し荷重を受けたウェブのひびわれ抵抗を求めるには最初の30万回を基準にした。

図-2 ひびわれの分布(数字はひびわれの生じたときの支点でのせん断力値およびサイクル数を表わす)



局部的な欠陥を有していた No. 2 はりを除いて、最初の斜めひびわれは支点から80~120cm、すなわち支点無反力および支点補剛部の影響範囲外に生じた。最初に現われた斜めひびわれの中で長さおよび幅の顕著なものは断面の中心近傍に生じたものであった。このことから、曲げ部材を設計する場合はひびわれ抵抗の検査は断面の重心近傍のみで行えば良いといえる。なお、縦ひびわれは、小さいプレストレスしか有しない

No. 4 はりを除いては生じなかった。

くり返し荷重を受けて生じた代表的なひびわれの傾き角は次の範囲内にあった。

|          |                   |           |
|----------|-------------------|-----------|
| No. 1 はり | 29°~35° (1つは 22°) | 平均 30°    |
| No. 2 はり | 32°25'~37°40'     | 平均 35°    |
| No. 3 はり | 30°~41°           | 平均 35°22' |
| No. 4 はり | 30°~37°           | 平均 33°    |

よく知られた式  $\tan \alpha = \sigma_{1p} / \tau$  ( $\tau$  はせん断応力) により計算されたひびわれ角は多くの場合実験値よりも 2~3° 小さくなっているだけで良く一致していた。同様な結果が他の実験からも得られている。これらのことからこの式によりひびわれ角を計算することの十分な信頼性が得られた。

最初に現われた斜めひびわれの幅は No. 1~No. 3 のはりでは 0.03~0.06 mm であったが、No. 4 はりでは 0.1 mm であった。くり返し載荷の終了時には、これらの幅は、より大きいプレストレスを受けた No. 1 はりでは 0.04~0.08 mm, No. 2 はりでは 0.05~0.15 mm, No. 3 はりでは 0.05~0.09 mm, そしてより小さいプレストレスを有する No. 4 はりでは 0.1~0.25 mm であった。このことはプレストレスの大きさが斜めひびわれ幅に本質的な影響を与えることを示している。比較的これらのひびわれ幅が小さいことは、密な配筋(鉄筋比 1.5%) によって説明される。残留ひびわれ幅は 0.02~0.03 mm で大きい場合でも 0.05 mm を越えなかった。

静荷重の下では、最初の斜めひびわれは  $\sigma_{1p} = 24.21 \text{ kg/cm}^2 = R_p^H$  で生じたが、くり返し荷重の下では  $\sigma_{1p} = 17.4 \sim 22.3 \text{ kg/cm}^2$ , 平均して  $20.3 \text{ kg/cm}^2 = 0.8 R_p^H$  で生じた。したがって、引張主応力を受けるコンクリートの耐久性はくり返し荷重によって 20% だけ低下させられているということがわかった。

(委員 星 楚 正明)

## 乱流境界層内のせん断力の直接測定法

“The Measurement of Skin Friction in Turbulent Boundary Layers with Adverse Pressure Gradients”

Brown, K.C. and Jonbert, P.N.  
 Jour. of Fluid Mechanics, Vol. 35, Part 4,  
 pp. 737~757, March (1969)

逆圧力勾配の存在する乱流境界層でのせん断力を測定する場合には、圧力勾配に起因する二次的な力の影響を考慮しなければならない。この論文では、せん断力の直接測定法を報告し、実験結果を基に二次力の大きさおよび 3 次元乱流境界層に適用した場合の精度についても議論する。

## (1) 従来のせん断力測定法

壁面でのせん断力測定法には、運動量法、壁面相似法、染料法などがある。運動量法は管路などの流れに適用され、せん断力と圧力損失のつり合いを利用する方法であるが、管の断面積の微小変化がせん断力の推定値に大きな誤差を及ぼす。また発達過程にある流れでは、運動量厚の変化なども影響するので精度は低下し、逆圧力勾配が存在する時にはさらに正確になる。

壁面相似法には、流速分布の相似性を利用した Clauser (1954) らの方法、熱伝達の相似性による Ludwig (1949) らの研究、圧力差からせん断力を求める Preston 管の類がある。これらの方法は、乱流境界層内の壁面近くでの流れの相似性に基づくものであるが、3 次元境界層に対しては、相似法則が成立するか否かは未だ確立されていない。第 3 の染料法は Meyer (1966) が報告しているが、せん断力の定量的な測定には精度が不十分である。

## (2) 浮動素子式せん断力計

以上の方法に対して、これから述べる浮動素子法は、壁面近傍の流れに関する仮定が不要なので、3 次元流に対しては適用される。測定の原理は、図-1 に示すように、壁面での流線の方向に自由に動きうる薄い素子により壁面の一部を置き換え、その素子に作用する力を測定するものである。素子に働く力  $F$  は、せん断応力  $\tau_0$  と素子面積  $S$  の積になるはずであるが、圧力勾配が存在する時にはさらに二次的な力が加わる。その一つは素子の周囲の空げきでの圧力が一様でないために素子に作用する圧力勾配と逆方向の力であり、第 2 は、空げき内に生じる流れによる力で、この力の方向は間げき  $g$  が小さければ、壁面での流線の方向と一致する。他に粗度としての間げきの効果や、素子の変位の影響なども考慮せねばならない。これらの影響は簡単には次式で表わせる。

$$\frac{F}{\tau_0 S} = \frac{F}{\tau_0 S} \left[ \frac{S^{1/2} u_\tau}{\nu}, \frac{\alpha S^{1/2}}{u_\tau^2}, \frac{\chi}{S^{1/2}} \right] \dots \dots (1)$$

ここで、 $u_\tau = (\tau_0 / \rho)^{1/2}$ ,  $\alpha = (1/\rho) dp/dX$  である。

図-2 は、3 次元流に対する、せん断力計の構造を示

図-1 浮動素子式せん断力計の原理

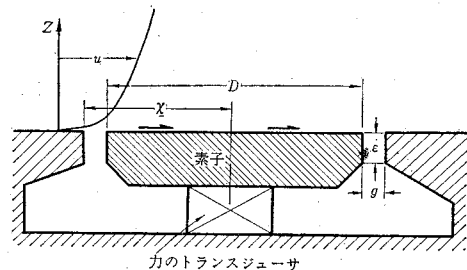


図-2 浮動素子式せん断力計の構造

A: 素子, B: 素子支持台, C: 板ばね, D: ダンパープレート, E: 差動トランス, F: トランス・コア, G: トランス据付台, H: 固定ねじ, J: 伝動装置, K: 圧力タップ, L: 計器据付台, M: 風防シールド, N: 電気端子

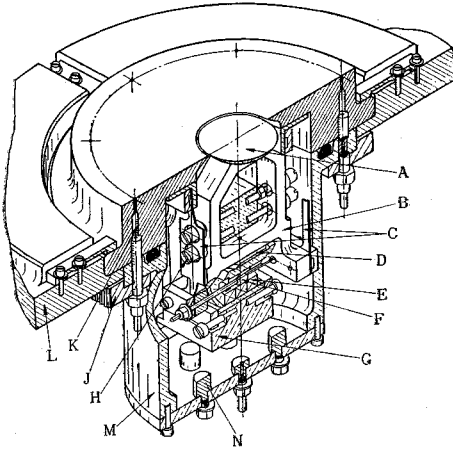


図-3 浮動素子の検定曲線

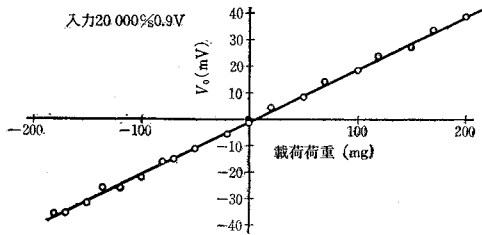


図-4 載荷方向と浮動素子出力の関係

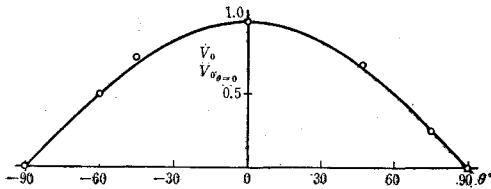
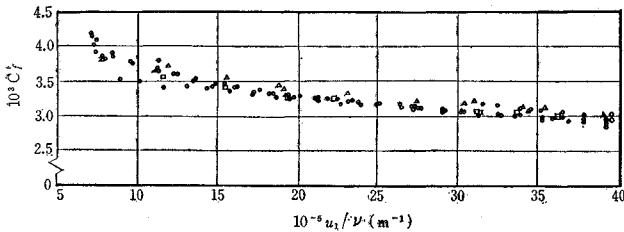


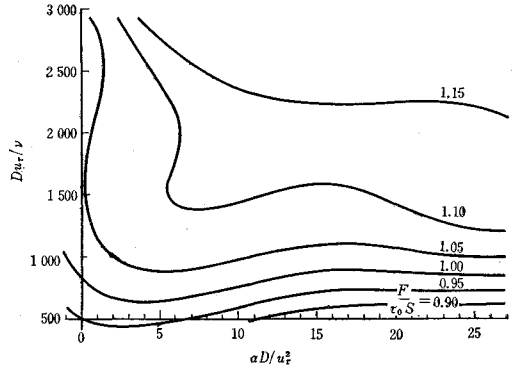
図-5 0 圧力勾配境界層におけるせん断応力



○: Preston 管 □: Clauser の方法 △: 浮動素子法

す。素子の直径(図-1における $D$ )は1.9 cm, 間げき( $g$ )は0.076 mmで, 長さ2.5 cmの3枚の青銅製板ばねの上に支持されており, その位置は直線変化式差動トランスによって測定される。また, 圧力勾配測定のために静圧タップが設けられている。装置の据付台にはモ

図-6 2 次力のコンター



ーターと連結した伝動装置がついており, 3次元流におけるせん断応力の方向を知るために, 装置全体を鉛直軸のまわりに回転することができる。差動トランスの一次側には, 20 000 c/sの正弦発振器から1 V rmsの電圧が印加される。0~40 mVの出力電圧 $V_0$ は自乗平均式電圧計で測定した。

静的載荷法による検定の結果は図-3のようになり, 差動トランス軸と載荷の方向のなす角度 $\theta$ による感度変化は, 図-4のように正弦曲線となる。

### (3) 測定結果と考察

実験には断面34×25 cmの小さい風洞を用い, 最初に, 圧力勾配のほとんど存在しない2次元境界層の中でせん断力を測定した。浮動素子式せん断力計の他に, Preston管およびピトー管を併用し, Preston管の検定にはPatel(1963)の曲線を, ピトー管による流速分布にはClauserの方法を適用してせん断力を求めた。その結果を示したのが図-5である。 $C_f'$ は摩擦係数で $C_f' = \tau_0 / 1/2 \rho u_1^2$ ,  $u_1$ は自由流の流速である。浮動素子による測定には,  $x$ の変化に対する補正がなされている。図-5によれば, Preston管とClauserの方法は良い一致を示すが, 浮動素子法の値は4~5%大きく出ている。これは, わずかに存在する圧力勾配や, 間げきの粗度効果などによると思われる。

次に, 風洞内に圧力勾配プレートを設置して測定点に強い圧力勾配を生じさせた状態で実験を行なった。測定結果を式(1)に基づいて無次元化し, それを用いて図-6に示すような補正曲線を得る。 $F$ が浮動素子法による測定値で,  $\tau_0$ はPreston管による値を用いている。2次力の影響は最大15%と比較的小さく, 系統的な傾向を示すことがわかる。この補正曲線を再びデータに適用すると $F/\tau_0 S$ の標準偏差は0.0272となり, 個々の値がPreston管による記録の5%内に入る確率としては0.93を得る。

これは Preston 管の記録の散らばり(最大 10%)を考慮すれば十分な精度といえる。

3次元の流れでは, Preston 管などの壁面相似法は利用できず, 2次元に対する補正曲線を直接求めることはできない。しかしながら, 2次元はせん断力に比してかなり小さいことと, 特に圧力勾配の方向に作用する2次元力は, 最大でもせん断力の3%に過ぎずせん断力の方向の2次元よりきわめて小さいことがわかっている。したがって, 2次元の方向はせん断力の方向と一致し, その大きさは2次元流の場合と変わらないと仮定して, 3次元流れの場合の補正を行なっても, 精度には無理はないと思われる。

(委員 渡辺 晃)

### 1次元流れにおけるセイシュ運動

“Seiche Motions for One-dimensional Flow”  
Clarke, D.J.  
Jour. of Marine Research, Vol 26, No. 3,  
pp. 202~207, September (1968)

水深が変数で表わされ, かつその運動が1次元とみなされる湾の振動は, すでに Chrystal(1906), Proudman(1914), Defant(1918), 日高(1936)らによって取り扱われてきた。ここではその新しい近似解法についてのべる。

座標原点 O を湾奥の静水面にとり, OX を湾軸に平行に OY をそれと直角に, OZ を鉛直方向にとる。ξ を水平変位とすると, 水平速度 u は式(1)で表わされる。

$$u = \dot{\xi} \dots\dots\dots(1)$$

垂直変位 ζ がそこでの水深 h(x, y) に比べて小さくまた, 垂直方向の加速度は無視できるとすると, 運動および連続の方程式は

$$\dot{u} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} \dots\dots\dots(2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \{ \xi A(x) \} = -\zeta b(x) \dots\dots\dots(3)$$

ただし g は重力加速度, A(x), B(x) は原点から x だけ離れた点の断面面積および幅を表わす。式(2)は式(1), (3)から

$$\left. \begin{aligned} \ddot{\xi} &= g \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{1}{b(x)} \frac{\partial}{\partial x} \{ A(x) \xi \} \right] \\ &= g b(x) \frac{1}{b(x)} \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{1}{b(x)} \frac{\partial}{\partial x} \{ A(x) \xi \} \right] \end{aligned} \right\} \dots\dots(4)$$

となる。ここで流量および面積変数を式(5)で定義する。

$$\alpha = A(x) \cdot \xi, \quad x = \int_0^x b(x') dx' \dots\dots\dots(5)$$

すると, 恒等的に次式が成立する。

$$\frac{1}{b(x)} \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x} \dots\dots\dots(6)$$

結局式(4)は

$$\ddot{\alpha} = g f(x) \frac{\partial^2 \alpha}{\partial x^2} \dots\dots\dots(7)$$

ただし

$$f(x) = A(x) b(x) \dots\dots\dots(8)$$

である。周波数 σ を見出すため, 次の置き換えを行なう。

$$\alpha = \alpha^* e^{i(\sigma t + \epsilon)} \dots\dots\dots(9)$$

ここで α\* は x または x のみの関数である。

よって式(7)は次のようになる。

$$\frac{d^2 \alpha^*}{dx^2} + \frac{\sigma^2}{g f(x)} \alpha^* = 0 \dots\dots\dots(10)$$

今後は簡単のため \*印は省略する。境界条件は x=0 および l において ξ=0, すなわち

$$x=0 \text{ および } x_l \text{ において } \alpha=0 \dots\dots\dots(11)$$

である。ただし l は湾長, x\_l は湾の面積で

$$x_l = \int_0^l b(x) dx \dots\dots\dots(12)$$

で表わされる。Galerkin 法を適用して, 基本方程式式(10)を境界条件式(11)のもとに解く。式(11)から近似解は

$$\begin{aligned} \alpha_n(x) &= x(x-x_l)(a_1 + a_2 x + a_3 x^2 + \dots + a_n x^{n-1}) \\ &= \sum_n a_i \varphi_i \dots\dots\dots(13) \end{aligned}$$

の形に展開される。そして直交性の条件

$$\int_0^{x_l} L(\alpha_n) \varphi_j dx = 0, \quad j=1, 2, \dots, n \dots\dots\dots(14)$$

で, j の各値に対し係数 a\_i が計算され, それは -μ\_ij + λν\_ij なる形を有する。ただし簡単のため式(10)を L(α) とおき, かつ λ = σ²/g である。n 次の正方行列 A, B をそれぞれ A=(μ\_ij), B=(ν\_ij) で定義すると, 式(14)の積分は x を a\_i の縦ベクトルとして (A-λB)x=0 で表わされる。この方程式が矛盾しないためには, |A-λB|=0, それゆえ λ, x はそれぞれ固有値および B⁻¹A の固有ベクトルとなる。

近似関数の次数 n は1次元という仮定のもとでは, さほど多くとる必要はなく, また積 A(x) b(x) が直接に積分できないときは, 数値積分を行なう。

#### 数値計算例

##### 1) 矩形湾

矩形湾に対する計算は完全に解析的に解き得る。結果は n 次の振動に対し次のように与えられる。

$$\sigma = n \pi [(gh)^{1/2}/l]$$

$$\alpha = A \sin \frac{n \pi x}{l} \cos \sigma t$$

h は一定水深を表わし, 節はすべての t に対し

$d\alpha/dx=0$  で与えられる。

Galerkin 法による近似値は  $N$  を多項式の次数とすると、基本振動に対しては、

| $N$ | $\frac{\sigma l}{(gh)^{1/2}}$ | $\alpha^*$                      | 節       |
|-----|-------------------------------|---------------------------------|---------|
| 2   | 3.162                         | $Ax(l-x)$                       | 0.5 $l$ |
| 4   | 3.14161                       | $Ax(l-x)(l^2+1.132lx-1.132x^2)$ | 0.5 $l$ |

倍振動に対しては

| $N$ | $\frac{\sigma l}{(gh)^{1/2}}$ | $\alpha^*$                             | 節                     |
|-----|-------------------------------|--|-----------------------|
| 3   | 6.481                         | $Ax(l-x)(l-2x)$                        | 0.211 $l$ , 0.789 $l$ |
| 5   | 6.285                         | $Ax(l-x)(l^3+0.634l^2x-8lx^2+5.43x^3)$ | 0.237 $l$ , 0.763 $l$ |

## 2) だ円湾

最初の5つの周波数は Goldstein (1928) によれば、次式で与えられる。

$$\frac{\sigma(gh)^{1/2}}{a} = 1.8866, 3.4866, 5.0699, 6.6477, 8.2231$$

Galerkin 法では、7次の多項式で近似すると

$$\frac{\sigma(gh)^{1/2}}{a} = 1.8993, 3.5163, 5.1158, 6.7037, 8.4658$$

で表わされる。ただし積分にはシンプソン法を用いた。このほか、日高によって与えられた紡錘形湾に対しても非常によい近似を与えている。

本法の特徴は、広範囲の湾形に対して、簡単に適用できかつ周波数のみならず、流量および波高も得られることにある。 (委員 木原 力)

## 溶融塩増殖炉

“Molten-salt Breeder Reactors”  
 Rosenthal, M.W., Robertson, R.C.  
 & Bettis, E.S.  
 Nuclear Engineering International,  
 Vol. 14, May (1969)

### (1) はじめに

現在、増殖炉は世界各国で開発されつつある。そのタイプとしては増殖比の高い高速増殖炉 (LMFBR または単に FBR と略す) だけが追求されており、 $\text{Th}^{232}$ - $\text{U}^{233}$  の燃料サイクルによる熱中性子増殖炉 (MSBR と略す) は見過されている。われわれの目指すところは増殖比を高くすることではなく、安価な電力を現在および将来にわたって供給することにあるはずである。

増殖炉の優劣を決めるものとしては、増殖比の他に燃料インベントリーがあり、経済性が進むにつれてインベントリーの方が重要になってくる。溶融塩型熱中性子増殖炉は高速増殖炉に較べて必要なインベントリーがずっと少ないので、増殖比は、後者の方が高いが十分匹敵し得るのである。さらに溶融塩増殖炉の利点としては、次

のような点が挙げらる。一つは溶融塩増殖炉はそれだけで燃料の再処理ができ、新しく燃料の処理および成型の施設を開発する必要がないので燃料サイクル費が安くなるといことである。さらに溶融塩炉は、すでに実証された技術によって先ず転換炉から始め、燃料処理の機構を改良して行なって増殖炉へ進むこと

ができるという利点もある。もう一つ利点として加えられることは、溶融塩炉はどんな燃料によってもスタートアップできるという柔軟性を持っているということである。

なお、溶融塩炉についてはアメリカの ORNL で長い間研究されており、ORNL では溶融塩実験炉を運転している。

### (2) 材 料

燃料として用いる塩(以下燃料塩と呼ぶ)は  $\text{LiF}$ - $\text{BeF}_2$ - $\text{ThF}_4$ - $\text{UF}_4$  (72-16-12-0-4 モル%) から成り、融点は  $500^\circ\text{C}$ 、運転温度における蒸気圧 0.1 mmHg 以下、粘度は灯油のわずか2倍、熱容量は水とほぼ等しく、熱伝導度は水の2倍以上である。

冷却材に用いる塩(以下冷却塩と呼ぶ)は  $\text{NaBF}_4$ - $\text{NaF}$  (92-8モル%) から成り、融点は  $385^\circ\text{C}$ 、蒸気圧は  $607^\circ\text{C}$  で 310 mmHg、そして粘度、熱容量、熱伝導度はほとんど水に近い。

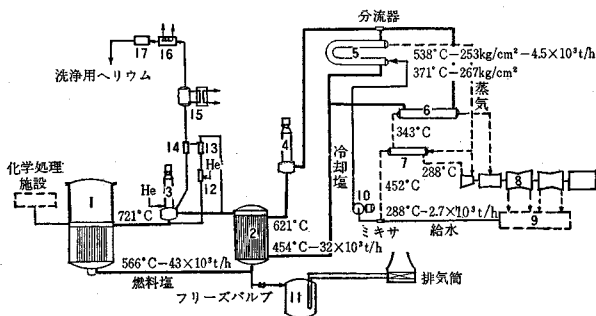
燃料塩および冷却塩を包む部分はすべてニッケルをベースとして合金ハステロイNが用いられる。この材料は弗化塩の侵食に強く高温下における強度も優れており、設計許容応力は  $721^\circ\text{C}$  で  $246 \text{ kg/cm}^2$  である。加工性および溶接性はステンレスと余り違わず、放射線の照射にも侵されない。

溶融塩炉の減速材および反射材としては無垢の黒鉛が最適である。ポーラス ( $< 1 \mu$ ) なものでも燃料塩が入り込むということはなく、また Xe に対する透過性も熱処理すれば小さく押えることができる。黒鉛の場合の1つのやっかいな問題は、中性子の照射によって大きさが変わることである。

### (3) プラント

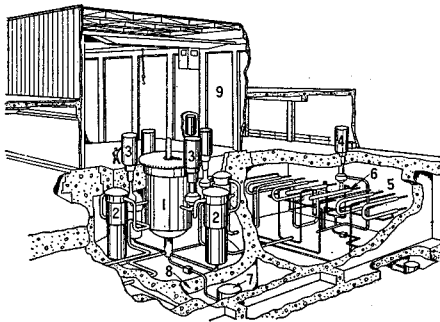
溶融塩増殖炉の簡単なフローダイアグラムを図-1に示す。燃料塩は炉心の中を下から上に流れ、そこで  $566^\circ\text{C}$  から  $721^\circ\text{C}$  になる。炉心および一次熱交換器を通る燃料塩は  $53 \text{ m}^3/\text{min}$  のポンプ4台で循環させる。

図-1 1,000 MWe 溶融塩増殖炉発電所のフローダイヤグラム



1—原子炉, 2—一次熱交換器, 3—燃料塩循環ポンプ, 4—冷却塩循環ポンプ, 5—蒸気発生器及び過熱器, 6—蒸気再熱器, 7—蒸気予熱器, 8—タービン発電機, 9—復水及び8段給水加熱系, 10—給水圧力ブースターポンプ, 11—燃料塩ドレンタンク及び除熱系, 12—発泡器, 13—ガス分離器, 14—エントレインメントセパレータ, 15—オフガスタンク, 16—活性炭ベッド, 17—クリプトン・トリチウム除去フィルター

図-2 溶融塩増殖炉原子炉セル部分内部透視図



1—原子炉, 2—一次熱交換器, 3—燃料塩循環ポンプ, 4—冷却塩循環ポンプ, 5—蒸気発生器及び過熱器, 6—蒸気再熱器, 7—燃料塩ドレンタンク, 8—二重格納構造, 9—格納建家

熱交換器の2次側を流れる冷却塩は  $83 \text{ m}^3/\text{min}$  のポンプ4台で循環させている。冷却塩は熱交換器に入る時は  $454^\circ\text{C}$  である時は  $621^\circ\text{C}$  になっており、蒸気発生器および隣りのセルにある再熱器へと熱を運ぶ、負荷の変動に対しては冷却材の速度をいろいろ変えることによって流量を調節する。

蒸気系統は超臨界蒸気出力サイクルを用いるのでタービンには  $246 \text{ kg}/\text{cm}^2$ ,  $538^\circ\text{C}$  の蒸気を送られる。超臨界サイクルは最近大容量のプラントで実績を示しており、44%の熱効率が得られるという点で魅力的である。また超臨界サイクルを用いる給水の予熱方法や、塩の局所的な固化を防ぐための蒸気の再熱の方法が簡単になる。

原子炉セルおよび4つある蒸気発生器セルのうちの1つを図-2に示す。原子炉セルは鉄筋コンクリートできており、内径約  $20 \text{ m}$ 、高さは  $10.7 \text{ m}$  である。このセルは、電気ヒーターであらかじめ熱しておき、絶えず  $538^\circ\text{C}$  程度になるように維持する。セルの壁は二重格納式で、炭素鋼のプレートが内側および外側の格納容器をなしており、またそれが  $\gamma$ 線によるコンクリートの発熱

を柔らかげている。セルの内側には高温断熱材およびステンレスの放射熱反射材がライニングされている。原子炉セルの隣りには四角い蒸気発生器セルが4つある。ここには冷却塩ポンプおよび、蒸気発生器、再熱器等が入っている。原子炉セルの場合も同様だが、機器はすべて屋根構造物からサポートをとるようにする。セルは内圧  $2.8 \text{ kg}/\text{cm}^2$  で設計されており、蒸気のろう洩があった場合にはそれをセル内に逃がせるようになっている。

(4) 原子炉およびその他の機器

原子炉容器の断面を図-3に示す。表-1には原子炉の主データを掲げてある。他に主な機器としては、一次熱交換器、蒸気発生器、再熱器、循環ポンプ、ドレンタンク、オフガス系の機器等がある。

(5) 燃料塩の再処理

転換率を高めるためには核分裂生成物およびプロトアクチニウム (Pa) による中性子の損失を少なくする必要がある。Pa<sup>233</sup> による中性子の吸収は、中性子の損失だけでなく、U<sup>233</sup> になるべきはずの Pa<sup>233</sup> が中性子を吸収して Pa<sup>234</sup> になり、この Pa<sup>234</sup> は無用の U<sup>234</sup> に壊変してしまうので二重の損失となる。この損失を少なくするには Pa を除去し、壊変して U<sup>233</sup> になるまで炉心から出しておく必要がある。Pa の除去、取出しは抽出装置で行なわれ、燃料塩と活性金属を溶解させた液体ビス

図-3 原子炉容器断面図

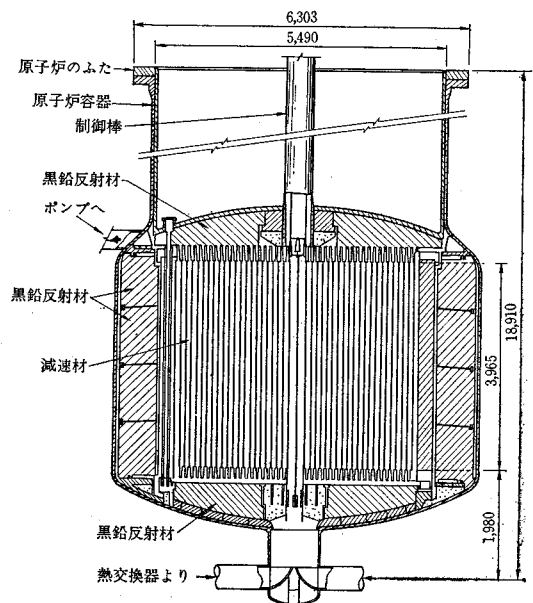


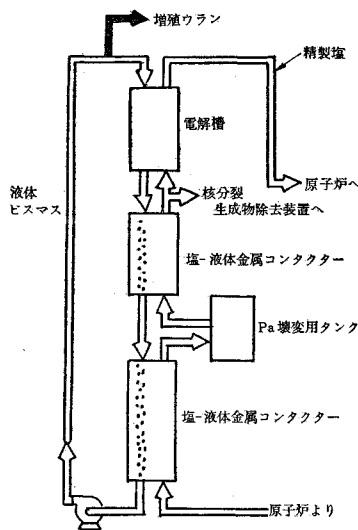


表-1 1000 MWe 溶融塩増殖炉発電所の主データ

|                              |      |
|------------------------------|------|
| プラント                         |      |
| 有効熱出力 MW(t)                  | 2250 |
| 電気出力(グロス) MW(e)              | 1035 |
| 電気出力(ネット) MW(e)              | 1000 |
| 熱効率(%)                       | 44.4 |
| 原子炉                          |      |
| 原子炉容器内径 (m)                  | 6.7  |
| 容器高さ(中心部) (m)                | 6.1  |
| 容器壁厚 (mm)                    | 51   |
| 容器フタ厚 (mm)                   | 76   |
| 容器設計圧力 (kg/cm <sup>2</sup> ) | 5.3  |
| 炉心高さ (m)                     | 4.0  |
| 炉心要素の数                       | 1412 |
| 炉心の平均出力密度 (kW/L)             | 22.2 |
| 炉心黒鉛の耐用年数 (年*)               | 4    |
| 原子炉中の黒鉛総重量 (t)               | 295  |
| 一次系中の塩の総体積 (m <sup>3</sup> ) | 49   |
| トリウムインベントリ (t)               | 68   |
| 原子炉および処理プラント中の核燃料インベントリ (t)  | 1.4  |
| 増殖比                          | 1.06 |
| 増殖時間 (年)                     | 21   |

\* プラント稼働率を 80% とする。

図-4 プロトアクチニウム除去系



マスとを接触させる。この装置の原理は、Th は Pa より弗化傾向が強く、Ra は U より、弗化傾向が強いということである。したがって、Th によって塩の中の PaF<sub>4</sub> はビスマスの中に移され (Pa になる)、ビスマスの中の Pa は UF<sub>4</sub> によって塩の中にもどされる (PaF<sub>4</sub> になる)

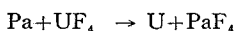
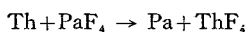


図-4 を見れば判るように、炉から出てきた溶融塩の一部がコラムの下部から入り Pa を含んだ溶融ビスマスの下降流と接触する。溶融塩中の UF<sub>4</sub> はすべてビスマス中に移り (U になる)。コラムの下部から出て行く。Pa を PaF<sub>4</sub> として運んでいる溶融塩の上昇流は壊変用

タンクに入る。タンクから出た溶融塩は上部コラムに入り、Th を含んだビスマスと接触する。Th と Pa は入れ代り、Pa はビスマスの中でコラムの中を下降する。このように Pa はビスマスの中で U に壊変するまで閉じ込められることになる。すなわち、上部コラムでは下降流の中の Th と入れ代るので上部から外に出るわけには行かないし、下部コラムでは上昇流の中の UF<sub>4</sub> と入れ代るから下部からも出るわけには行かない。装置の下部から出たビスマスは U とともに上部の電極セル中の陽極部へ行く。陽極部では U は UF<sub>4</sub> に変り、陰極部から上昇してきた塩とともに炉にもどる。陰極部においては UF<sub>4</sub> は Th に還元され、陽極からくるビスマス (U は除去されている) の中に移動する。Th を含んだビスマスはコラムの中を下降し、上述した操作が繰返される。

Pa 除去のサイクルを 3 日とすると、塩の再処理は 11 l/min の割合でよい。この流量を処理する接触コラムは内径 200 mm、高さ 3.66 m、壊変用タンクは 5.66 m<sup>3</sup> あればよい。電極セルも小型のもので済む。したがって再処理装置は炉のすぐ傍のかなり小さなセルの中にすべて収め得る。核分裂生成物の毒物のうち最も重要なものは Xe<sup>135</sup> で、これはヘリウムの注入および分離装置によってガス状にして除去する。Xe<sup>135</sup> の次に問題になるのは希土類であるが、これについては Pa の場合と同じようなビスマスによる抽出装置等を考えている。

#### (6) 保守および安全性

溶融塩の設計においては保守の問題に十分な考慮を払わなければならない。というのは溶融塩炉の一次系およびオフガス系、燃料処理プラント等は著しく放射性を帯びているからである。

点検の必要な機器の上には取外し可能なプラグを配置し、開口部の上には作業用しゃへいを設けるようにする。原子炉建家は、換気系を完全に密閉管理できるようにする。

溶融塩炉はそれ自身独自の安全性を有している。すなわち燃料塩および冷却塩は低圧で運転するので潜在するエネルギーも小さく、水や空気と触れても急激に反応するということはない。またある程度の核分裂生成物は絶えず一次系から取り除かれ、ヨウ素やストロンチウムは塩の中で安定な形をとっている。一方、核分裂生成物がプラントのいろいろな箇所で見られるという反対の一面も持っており、それらを完全に冷却し閉じ込める方法を確立しておかなければならない。

#### (7) コスト

溶融塩増殖炉の燃料サイクル費を表-2 に示す。これは表-1 に示したプラントについて試算したものであ

表-2 1000 MWe 溶融塩増殖炉の燃料サイクル費の試算

|                    |             |
|--------------------|-------------|
| 核燃料インベントリ          | 0.094 円/kWh |
| トリウムインベントリ         | 0.003       |
| キャリヤ塩インベントリ        | 0.011       |
| トリウムおよびキャリヤ塩メーキャップ | 0.018       |
| 処理プラント固定資産税および運転費  | 0.086       |
| 増殖燃料販売クレジット        | -0.032      |
| 燃料サイクル費(ネット)       | 0.18        |

各材料のインベントリチャージは 10%/年、処理プラントの固定資産税 13.7%/年、 $U^{233}$ : 4 680 円/gr,  $U^{235}$ : 4 030 円/gr,  $ThO_2$ : 4 320 円/kg,  $Li^7$ : 43 200 円/kg, キャリヤ塩: 9 360 円/kg ( $Li^7$  を含む) とする。処理プラントは約 28 億 8 000 万円と推定されている。

る。試算の方法は USAEC の方法に従っており、すでに確立されている溶融塩実験炉の技術を応用した場合という大きな仮定の下に計算したものである。また他のプラントと比較できるように燃料処理プラントの固定費および運転費も含めてある。表-3 には発電所の建設費を示した。これは 1969 年現在の値で、建設期間(5年)中の物価の上昇は見えていないが、その期間中の金利は含んでいる。表-4 には発電コストを示してある。民有の場合として、固定資産税は 13.7% とした。この表より溶融塩増殖炉コストが安いのは燃料サイクル費が安いことによるということが良くわかる。

(8) 結 語

1000 MWe 溶融塩炉の概念設計研究により、従来の溶融塩実験炉の技術で安価な電力が得られるということがわかった。溶融塩炉は転換炉として安価であるばかりでなく、燃料の処理系を改良すれば高性能の増殖炉となり得る。溶融塩実験炉の運転により溶融塩炉の技術が基本的には正しいことが証明された。次なる段階は実用サ

表-3 1000 MWe 溶融塩増殖炉発電所の建設費の試算

|                         |         |
|-------------------------|---------|
| 構造物および敷地造成              | 41.4 億円 |
| 原 子 炉                   |         |
| 容 器                     | 21.2    |
| 黒 鉛                     | 21.6    |
| しゃへいおよび格納施設             | 11.2    |
| 加熱および冷却系                | 4.7     |
| 制 御 棒                   | 3.6     |
| ク レ ー ン                 | 0.7     |
| 熱 伝 達 系                 | 79.9    |
| ドレンタンク                  | 15.5    |
| 廃棄物処理および処分              | 1.8     |
| 計測および制御                 | 14.8    |
| 給水供給および処理               | 18.7    |
| 蒸 気 配 管                 | 20.2    |
| 遠隔保守用機器                 | 23.8    |
| タービン発電機関係プラント機器         | 90.0    |
| 付属電気機器                  | 18.7    |
| そ の 他                   | 5.0     |
| 合計+6% (週 54 時間労働に対する余裕) | 392.8   |
| 合計+3% (販売に対する地域課税)      | 416.4   |
| 合計+33.5% (間接費)          | 428.9   |
|                         | 572.6   |

- ・ 固定資産税 13.7%, プラント稼働率 80% とする。
- ・ 黒鉛の耐用年数 4 年。黒鉛の単価を 8 000 円/kg とする。

表-4 1000 MWe 溶融塩増殖炉 発電所の発電単価の試算

|         |            |
|---------|------------|
| プラント資本費 | 1.12 円/kWh |
| 黒鉛交換費   | 0.03       |
| 燃料サイクル費 | 0.18       |
| 運 転 費   | 0.11       |
| 計       | 1.44       |

イズの実験炉を建設してすべての特性を実証し、各部分のスケールアップ燃料処理系の改良に着手することである。この次なる溶融塩炉が前の溶融塩実験炉と同じように成功すれば、未来の世界は溶融塩炉プラントから永久的にエネルギーの多くを得ることができるであろう。

(委員 田中 協一)

土木学会誌“合本ファイル”

土木学会誌を整理していただくために合本ファイルを販売しております。1ファイルで半年分(6冊)とじることができます。ご希望の会員は代金に送料を添えお申込み下さい。下記のとおりなるべく一括した方が送料が安くなります。

記

体 裁 B5判・薄グリーン・クロス装、ピン挿入式  
(株・テッサーの製造による)

定 価 150 円

送 料 1部 100 円 17部まで 200 円  
8部まで 160 円 26部まで 240 円

申 込 先 土木学会 (東京都新宿区四谷1丁目  
・振替東京 16828)



---

## 鉄筋コンクリート 工場製品設計施工指針案

B 6・228 650円 会員特価 550円 (〒70)

橋梁、土止壁、基礎杭、まくらぎ、などプレキャストコンクリート製品の応用範囲は広がる一方である。長年にわたる委員会の努力により、完成した最新の指針。条文・解説のほか、関連するJISのすべてを収録。

---

## ディビダーク 工法設計施工指針案

B 5・88 700円 会員特価 500円 (〒80)

## MDC工法設計施工指針案

B 5・94 700円 会員特価 500円 (〒80)

## パウル・レオンハルト 工法設計施工指針案

B 5・100 700円 会員特価 650円 (〒80)

## レオバ工法設計施工指針案

B 5・84 700円 会員特価 650円 (〒80)

各PC工法を、総則、材料、施工、設計の4編に分け、各条ごとに解説をつけ、各工法に関する詳細な参考事項を巻末に収録したPC工法別の設計・施工のための親切な指針。

---

## 土木材料実験指導書 昭和44年版

B 5・230 490円 (〒70)

セメント、骨材、コンクリート、鉄筋、アスファルトの5章に分け、それぞれの試験方法を解説し、巻末には試験結果を整理しうるデータシートを豊富に入れ、品質管理、異形鉄筋などを追加した最新版で学校教材に最適。

---

## 土木年鑑 1969

B 5・470 3500円 (〒とも)

口絵写真、論説、展望、工学技術および関連資料、事業、資料などに分類し、それぞれの専門家が執筆したビジュアルな年鑑。土木建設界と関連産業の動向を系統的に眺めうる、わが国唯一の役に立つ年鑑。学会編集・鹿島出版会刊。

---

## 橋 1967-1968

A 4・82 1500円 (〒150)

土木学会田中賞の設立を記念して誕生した、わが国橋梁界の歩みを年度ごとに通覧できる美しい橋の年報。受賞論文、受賞作品および応募作品などの紹介に加え、1967年に竣工した主要橋梁の一覧表を収録。一部カラー印刷。

---