

英国型原子力発電所の構造と土木工学上の課題

丹 羽 義 次*
森 忠 次**

1. ま え が き

Calder Hall 改良型原子力発電所を英国より輸入しようとするに際して、その耐震性が大きな課題となつている。原子炉による汚染、その廃棄物処理などに関する問題が各方面で論議され、わが国でもかなり研究が進んできたが、さて原子炉施設の構造問題となると研究の端緒についたばかりの状況である。これは原子炉構造の研究は実験用原子炉を使用して始めて可能になる要素の多いこと、わが国の状態が、まだ実際に建設段階にまで至っていないので、その必要性の少なかつたことなどによるものと考えられる。諸外国の実験用原子炉において、コンクリート施設にひび割れが発生し、内容物が洩れているものが数多く存在するとか、構造物は非常な高精度を要求され、工事は困難をきわめるとかという話も聞かれるように、耐震性以外に構造上研究を要する課題はきわめて多い。したがつて Calder Hall 原子力発電所の構造と建設経過をふり返つてみて、原子炉構造の特徴を探り、研究を要する課題について考察を加えることにする。

2. 英国型原子力発電所の占める位置

英米両国で現在運転中の原子力発電所としては、英国では Calder Hall、米国では Shippingport がある。この両者を比較すると、前者はもともと軍用プルトニウム生産を目的とした原子炉より発達したものであり、天然ウラニウムを燃料とし炭酸ガス冷却を行なうので、炉内の圧力は小さいが寸法が非常に大きくなる。これに反して後者は加圧水型と呼ばれるもので、船舶推進用原子炉に由来する。これは濃縮ウラニウムを用いる関係上、小型とすることができるが高圧で運転される。このような原子炉は、いずれも熱中性子型原子炉であり、原理上 20 種類くらいの型式が可能であるとされている。いままでに建設されたものの中では、英国型原子炉が最も大きい施設を要する点から、これらの建設にあつては、土木工学上、数多くの問題が存在する。

Calder Hall 発電所は軍用上プルトニウム生産と商業用発電の両目的をかねるものであり、このような発電所の建設が行なわれるに至るまでには、技術上ならびに軍用上多くの変遷があつた。しかしながら、1953 年 2 月

に建設を行なうべく断が下るや、政府、研究陣ならびに産業界が一体となつて協力し、早くも 1956 年 10 月に完成をみた。このためには、それ以前の基本的研究と GLEEP (1947 年 Harwell に作られた英国最初の天然ウラニウム原子炉、最大熱出力 100 kW) 以来、4 つの天然ウラニウム原子炉の建設と運転によつて築積された知識に負うところの大きいことはいうまでもない。しかしながら、研究—設計—建設を平行して行なわなければならないほど、工程に追われていたことも事実のようであり、解決されずに残っている問題も多く、また設計・施工は工程上無理をした点も存在するようである。

Calder Hall 発電所の建設・運転の経験をもとにし、その後の研究成果を加えて改良した発電所は、電気出力約 15 万 kW×2 基であり、これが Calder Hall 改良型と呼ばれるもので、3 種の異なつた設計により英国で建設中である。わが国に輸入される発電所も、これらの建設にあつている各社が競走して設計を行なつている。

英米両国の地上原子力発電所は、最初に述べたことからもわかるように、その国の社会状態の差が現われている。原子力発電の必要にさし迫られている英国が、現段階において米国より優れたものを作り上げたということであろう。英国においても、その他の型式の実験用原子炉を造り、より進歩した発電方法を研究していることはいうまでもない。注目すべきことは英国においてさえも、Calder Hall 型原子力発電所が有利なのはここ 10 年間くらいではないか、と考えていることである。その後は濃縮ウラニウムを燃料とする熱中性子炉が勢力をふるう可能性が強く、近い将来には最終目標の高速中性子増殖炉が完成されることと推測されている。事実、高速中性子増殖型の実験炉は、すでに諸外国において建設中である。

このように、原子炉型式の進歩は、まことに目ざましいものがある。したがつて、われわれは、かかる原子炉施設の設計・施工を十分合理的に行なうように、常に研究を重ねなければならない。3カ所で建設中の Calder Hall 改良型発電所は、それぞれ各種各様の設計を行なつているので、ここでは、それらの原型であり、数多くの資料が入手できる Calder Hall 発電所の建設記録を調査し、そこで提起された問題とその解決方法を以下に述べ、原子力発電所の構造に関する課題を探ることにする。

* 正員 工博 京都大学助教授、工学研究所

** 正員 京都大学助教授、工学部土木工学教室

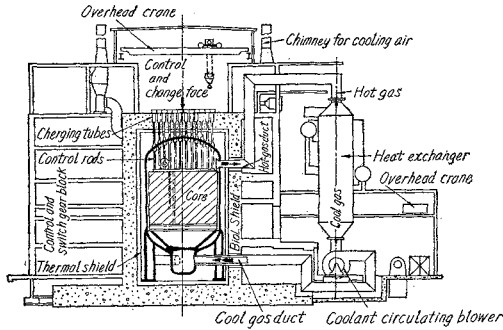
3. Calder Hall 発電所の構造概要

Calder Hall 発電所の概要については、すでに各方面で紹介されて、かなり周知のことと思われるので、ここでは図-1 および表-1 にしたがって、ごく簡単に構造と機能を示すことにする。

表-1 Calder Hall 発電所の概要

原子炉数×電気出力(熱出力)	2×35 000 (180 000) kW
炉心の直径×高さ	31×21 ft
全黒鉛の直径×高さ	36×27 ft
燃料孔、制御孔数	1 696, 112
燃料孔の格子間隔	8 in
圧力容器の直径×高さ	37×70 ft
圧力容器の厚さ	2(最大 4 ¹ / ₂) in
炭酸ガス入気、排気温度	140, 340°C
炭酸ガス圧力	7 kg/cm ²
全ウラニウム重量	130 t
全黒鉛重量	1 200 t
圧力容器重量	344 t
ダイアグリッド重量	36 t
黒鉛 1 コの寸法	約 8□×32 in
黒鉛 コ 数	約 58 000 (270 種類)
熱遮蔽、生体遮蔽厚さ	6 in, 7 ft
圧力容器設計応力	約 840 kg/cm ²
圧力容器設計温度	400°C
原子炉基礎寸法	11×130×104 ft
基礎重量	約 10 000 t
基礎より上部の重量	約 24 000 t

図-1 Calder Hall 発電所の一般構造



炉心部は黒鉛 58 000 コの積層体である。これに多数の鉛直燃料孔があり、この鉛直孔の中にはウラニウム燃料が装填されている。燃料孔中を下から上に炭酸ガスを通し、核分裂によつて生じた熱を取りだす。炉心部全体はこの炭酸ガスの圧力に耐える円筒型圧力容器によつて、おおわれている。圧力容器にはその底に直径 12 ft の入気孔、胴の上部は直径 3 ft 6 in の排気孔を始め多数の孔、頂部には 112 コの燃料装入孔というように無数の孔があいている。

黒鉛の支持法は、まず diagrid (高さ 4 ft, 格子間隔 4 ft の格子桁構造の円板) の上に 4 in 厚さの鋼板を置き、黒鉛と鋼との温度膨張の差による拘束を避けるために、さらにその上にステンレス スチールのボール ベアリングを配置して黒鉛を載せている。黒鉛積層体の位置を保つためには、その底部周辺に、半径方向の key を作

り、側面から水平の環状バンドで締めつけを行なつている。圧力容器の内外面同一位置から 20 コの腕金を出し、内側で diagrid を支え、外側を 10 コの逆 A 字型支柱で受けて荷重を基礎に伝える。

原子炉から逸脱する放射線と熱を防ぐには、まず 6 in 鋼板の熱遮蔽を置き、これから 2~3 in 離してコンクリート製の八角形状、厚さ 7 ft の生体遮蔽が設けられている。このすき間には空気を通して発生する熱を除去し、地上 200 ft の煙突から放出する。最初の設計では、炉心からは全中性子の 5% 程度が逸脱し、これらの遮蔽によつて、その外側では 5.5 mr/h (週 40 時間作業とし、許容線量 0.3 r とすると 0.73 m.p.l.) になると計算された。遮蔽壁の屋根の部分には多数の装入管が貫通し、側壁にも多くの管が通つている。

熱交換器および送風機は原子炉とは別個の基礎の上に設置された。熱交換器が炉よりかなり高い位置におかれているのは、万一送風機が止つた場合においても炉心が熱源となり、熱交換器が冷却体の役をなし、発生する自然対流によつて、原子炉の過熱を防ごうという配慮によるものである。

4. 炉心部の構造

炉心に使用する黒鉛は、きわめて純度の高いものが要求され、わが国においても世界的に優秀な人工黒鉛(試験中)を製造しようようになったということである。参考のために、炉心に使用される程度の黒鉛の性質を、表-2 に示す。黒鉛の応力-ヒズミ曲線コンクリートのそれと類似している。

黒鉛積層体の構造が非常に注目されているが、この積層体を構成するにあたって考慮された事項は、つぎのとおりであつた。

- (1) 積層体は安定した位置を保ち、燃料孔、制御孔の直線性が保持されること。
- (2) 孔の内部その他で黒鉛が欠けないこと。

表-2 黒鉛の性質

見かけ比重	1.65~1.75
空げき率	20~25%
曲げ引張強さ () ^{a)}	160~240 kg/cm ² b)
" (⊥) ^{a)}	90~140 kg/cm ² b)
圧縮強さ	280~400 kg/cm ²
弾性係数 ()	10~14×10 ⁴ kg/cm ²
" (⊥)	5~8×10 ⁴ kg/cm ²
熱伝導率 ()	0.45(0°C), 0.25(400°C) ^{c)}
" (⊥)	0.28(0°C), 0.20(400°C) ^{c)}
熱膨張係数 ()	1.4~2.0×10 ⁻⁶ °C ⁻¹
" (⊥)	2.7~3.5×10 ⁻⁶ °C ⁻¹
比熱	0.15(0°C), 0.36(400°C) ^{d)}

註: a) 成型時の押し出し方向に平行、直角を示す。

b) 温度の上昇によつて増大し、限定された量の中性子照射によつて増大する。

c) Cal/cm²·sec·°C

d) Cal/g·°C

- (3) Wigner growth によつて重大な結果を生じないこと。
- (4) 黒鉛を生ずる熱応力に黒鉛が耐えること。
- (5) 炭酸ガス漏洩が最小になること。
- (6) 炉心からの中性子逸脱が最小になること。
- (7) 各種の原因による体積変化によつても黒鉛積層体が安定であること。
- (8) 黒鉛の経済的な使用によつて積層体を構成すること。

以上の項目を満足させるために各ブロックは公差 ± 0.002 in で加工し、過大なものと過小なものを適当に組み合わせるにより、積層体としては 0.1 in の精度で仕上げられた。このように精密に積み上げるには当然支持法に注意しなければならない。このために diagrid の最大タワミは 0.25 in に制限された。これ以前の原子炉では、diagrid 上においた鋼板を調整ネジで高さの加減をしたこともあつたが、Calder Hall ではこの方法はとられていないようである。

黒鉛の積み方については省略するが、上に述べたことより明らかなように、炉心が大きい水平力を受ける場合については十分検討されていない。積層体はボールベアリング上に載つていて、水平移動に抵抗しうるのは底面周辺にある 24 コの比較的弱い key のみである。この位置よりわづか上には gas seal がめぐらされている。したがつて、この部分は水平地震力に対して非常に弱い構造であり、黒鉛が移動すれば ges seal を破壊し、压力容器にまで影響をおよぼすことが考えられる。一方積層体自身は各ブロックを key でかみ合わせ、水平にバンドで締めつけられているのみであるから地震に弱い。したがつて炉心部の補強策について各種の研究が行なわれている¹⁾。改良型では、ボールベアリングを入れていないものもある。このようにすることが可能であれば、積層体底部における困難はかなり除去されるが、黒鉛に加わる地震力が大きくなる。

このような構造であるので完成後の各部の変形を測定するために、テレビジョンカメラを用いたり光学的方法によつて、状況の調査、変形の測定を行なつている。一般に原子炉の運転を停止しても、残留放射能によつて長期間にわたつて人間の近づくことは不可能であり、密閉した容器内に原子炉が格納されるので、原子炉の安全性、耐久性は最高度の基準を要し、調査のために遠隔測定の方法が種々行なわれている。

Calder Hall より以前に建設された同型式の原子炉では、円柱の軸ならびに燃料棒装入方向は水平であつた。この場合では燃料棒を孔の中に横たえ、一方から押し進めれば他方から外へ出るが、Calder Hall では縦型にしたために、燃料棒は孔の中で積み上げ、その出し入れは上から行なわねばならなくなつた。そのためには燃料棒

の位置を保ち、さらにその重みによるクリープを防止するために非常な努力が払われた。かかる方法を採用した理由は、主として構造上の観点によるものであつた。すなわち縦型にすれば、压力容器と炉心の不同温度変化による拘束を避け、重量の大きい炉心を安定に支持することが容易になり、黒鉛の変形による燃料孔のヒズミを小さくすることも、やさしかつたことによる。

5. 压力容器の構造

炉心の直径は 26 ft 以上でなければ、中性子の逸脱が多くて連鎖反応を起し得ないと計算されていた。そして出力を大きくするには炉心を大きくする必要があるが、压力容器の厚さは溶接上 2 in に限定された。内圧 p をうけ直径 D 、厚さ t の薄肉円環に生ずる応力は、

$$\sigma = \frac{pD}{2t}$$

によつて与えられる。したがつて $t=2$ in, $\sigma=840$ kg/cm² とし、 $p=7$ kg/cm² とすると $D=40$ ft となる。鋼材の腐食などによつて t の値を 2 in より小さくしなくてはならぬことを考えると、上記より D は小さくなり、圧力と炉心寸法は压力容器の構造上の制約をうけることになつた。一方温度はウラン燃料の性質により制限をうけた。改良型では厚さ 3 in の溶接技術と燃料の改良によつて出力約 15 万 kW に増大できることになつた。

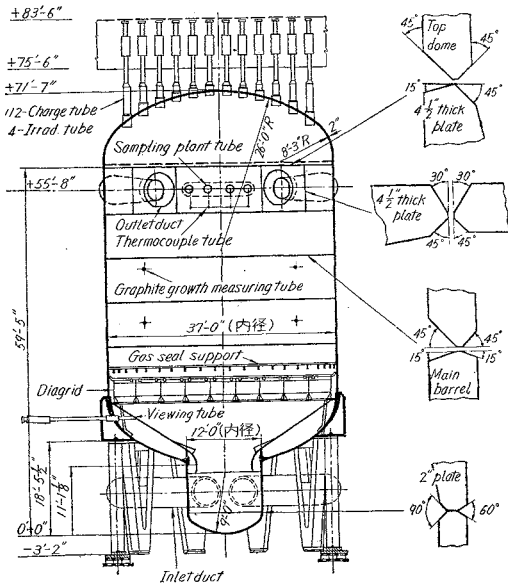
使用すべき鋼材は、溶接性、脆性、高温におけるクリープ強度、放射線損傷、炭酸ガスによる腐食などについて、十分検討を行なわなければならない。選ばれた鋼材は表-3 に示す Lowtem steel というキルド鋼である。

炉心および压力容器の支持構造はつぎのようである。压力容器下部ドームの内外両面に 20 コの補強板をつけ、これに腕金を溶接する。内側の腕金によつて diagrid を支持し、外側腕金は 10 コの逆 A 字型をフレームと称する支柱上に載つている。この支柱は上下両面ともに円柱面となつていて、loose bolt によつて取り付けられている。かかる構造によつて炉心重量は压力容器の応力に影響をおよぼさず、温度および内圧による压力容器の変形が拘束されることを防いでいる。ただし支柱の上端は二つに分れているので、上端の移動は真に半径方向でなく、いくぶん接線方向の拘束を与える。この構造がどれだけ水平荷重に対して抵抗しうるかが大きな問題である。支柱を逆 A 字型にしたのは、压力容器の下部に近づきやす

表-3 Lowtem Steel の性質

化学組成 (%)	C	Mn	S	P	Al
	0.12~0.16	1.00~1.20	<0.045	<0.045	1.51b/t
引張強さ	40~46 kg/mm ²				
シャルピー	35 ft·lb (-10°C)				
クリープヒズミ	0.18% (1×10 ⁵ hr, 790 kg/cm ² , 380°C)				
CO ₂ による腐食	0.002 in/20 yr, (7 気圧, 400°C)				

図一 圧力容器の構造



いたための配慮からであつたが、最近ではスカートと称する円筒上に載せた設計もある。

圧力容器は許容応力 840 kg/cm^2 によつて設計された。圧力容器には多数の管がとりつくので、かかる部分は適宜補強され、最大 4.5 in の厚板を使用した。とくに入気孔は直径 12 ft であるので、鍛造した大きい環を用いた。このときには材質の差について十分注意が払われた。図一は圧力容器の構造と、主要溶接部の寸法を示したものである。溶接の基準はロイド一級により、突合せ溶接のカ所はX線探傷が行なわれた。

頂部ドームには 112 コの装入管（直径 12 ft）が 32 in 間隔に通る。この位置は黒鉛の孔と一致し、しかも管は鉛直でなければならない。そのためには、

- (1) 黒鉛積層体および圧力容器の不同膨脹
- (2) 黒鉛の Wigner growth, 鋼のクリープによる変形
- (3) 温度およびガス圧による容器の変形

など、運転中に生ずる事項を考える必要があるのみならず、製作面からは、

- (4) 全溶接によつて作るときヒズミとヒズミ除去を行なつたときに生ずる変形
- (5) 巨大構造物における位置確定の困難
- (6) 手溶接によつて管接続を行なう場合の精度

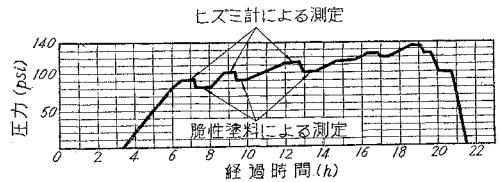
などについても困難がある。以上の点を考慮した結果、装入管に要求された精度は、水平位置 $1/8 \text{ in}$ 、高低差 $1/8 \text{ in}$ 、管全長に対する傾斜 $3/16 \text{ in}$ であつた。ついでに圧力容器に関して達成された精度を示すと、円周方向 $3/4 \text{ in}$ 、直径方向 $1/2 \text{ in}$ 、継手における不整 $3/16 \text{ in}$ 以上であつた。

圧力容器が組立てられると、A.P.I.—A.S.M.E. Code 1951 および B.S. 1500 の規定に従つて大規模なヒズミ除去が実施された。ステンレス スチールの 2 in 管を電気抵抗線として容器内側に張りめぐらし、外側を熱絶縁体でおおつて、電力 15 kW を用いて実行された。ヒズミ除去が終つたところ、数カ所に小さいキレツが発見され、そのカ所は再度溶接された。こうして容器が完成したのちに、ガスの漏洩調査、応力ならびに変形の測定などの目的をもつて、つぎに示す試験が実施された。

- (1) 常温、 9.5 kg/cm^2 の空気圧による試験
- (2) 常温、 0.15 kg/cm^2 の真空試験
- (3) 黒鉛積み上げ後、常温、 8.0 kg/cm^2 の空気圧試験
- (4) 黒鉛積み上げ後、 140°C 、 8.0 kg/cm^2 の空気圧試験
- (5) 黒鉛積み上げ後、真空試験

これらの試験結果は比較的成績良好であり、細部をわずかに改良して運転を行ないうる自信が得られた。たとえば(1)の試験では図三に示すように圧力を段階的に

図三 常温圧力試験



増加し、この間に 308 コのヒズミ計および脆性塗料を用いて応力測定を行なうのみならず、炭酸ガス導管、装入管などの変位、空気の漏洩なども調査された。この結果、腕金や導管の付近における圧力容器の応力が求められ、ひき起された応力を Von Mises—Henky の降伏条件と比較して、その比率が計算された。この最大値は底部ドームにとりつけた補強板の直下において生じ、設計圧力に対しては約 70% であつた。このようにして圧力容器には局所的な降伏の生じないことが確かめられた。炉心の重量による腕金付近の応力や温度変化による応力なども測定を要望されたが、測定器の性質上、安定した信頼しうる値が得られないので、やむを得ず、この問題は放棄された。なお高温試験の際に、圧力容器の下部は鋼板が二重に存在するので温度のずれを生じ、そのため、やや大きい温度応力を生ずるので改良が行なわれた。

6. 遮蔽および基礎構造

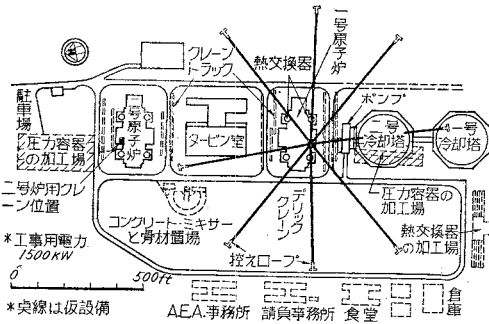
生体遮蔽用コンクリートの仕様によれば、比重 2.4、28 日強度 210 kg/cm^2 、配合は 1:2:4 程度で水素量 0.5% 以上の普通コンクリートが要求された。したがつて骨材は比重の大きい玄武岩を使用した。施工継目は段をつけてかみ合わせ、収縮ならびにキレツを避けるために w/c

を小さくした。遮蔽体に炉心に対し半径方向に直線のすき間があれば、放射線の漏洩を生ずること、また位置に関する精度が狂うことなどの点から、伸縮継目を作ることには注意を要する。

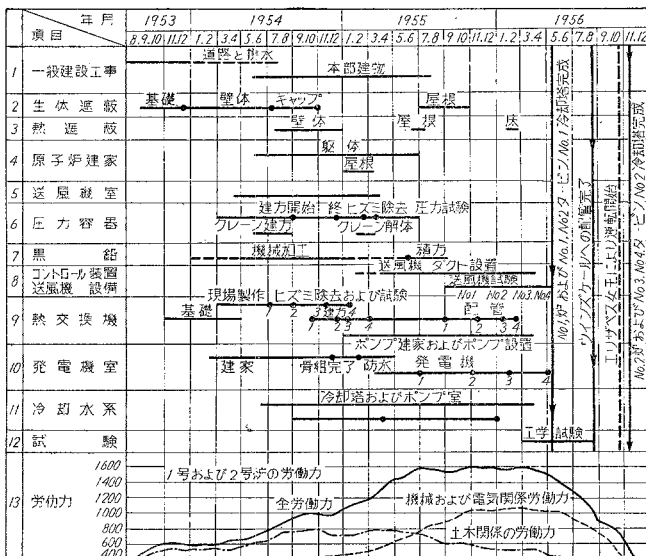
生体遮蔽内面の公差は $-1/4 \sim +1/4$ in と規定された。屋根を貫く装入管は圧力容器の温度、応力によつて移動するから、遮蔽コンクリートと管の間に余裕が必要である。このような余裕量はおおのの管によつて異なるので、管の移動量を決定するのに苦心が払われた。

6 in の鋼製熱遮蔽によつて、発生する熱の 90% を奪い、さらに生体遮蔽との間を空気で冷却することにより、コンクリート内面と外面との温度差を約 17°C におさえるように設計された。6 in の鋼の遮蔽効果はコンクリート 20 in に相当するものである。一般に生体遮蔽の温度最高点は内面から 1 ft または、それ以内の位置となり、内側の温度勾配はかなり大きくなる。このような温度変化と、それによつてひき起される応力に備えて、内外両面は 2 方向に鉄筋を補強された。生体遮蔽の設計には、荷重よりも温度と遮蔽効果の問題が重要であつた。

図—4 Calder Hall 発電所の配置



図—5 Calder Hall 発電所の建設工程



原子炉、遮蔽体その他を加えると重量は 20 000 t にも達し、直径 60 ft の面積に分布することになる。地盤は地下 60 ft に砂岩があり、圧力強度は地表下 16 ft にある基礎板下面で 25.5 t/m^2 にするように要求された。そのため表—1 に示す寸法の基礎に荷重を分布させ、4 方向に出ている炭酸ガス導管周辺の放射線遮蔽を行なうために必要な壁を基礎支持のための扶壁として用い、さらに各種の操作室を周囲に配置し、構造物全体の剛性を大きくした。熱交換器および送風機は別の基礎の上に配置し、これらを結ぶ導管は hinged bellow の使用、一定の荷重を支える吊り支持構造の採用などによつて、flexible な構造とすることに努めているが、それでも最大の不同沈下は圧力容器～熱交換器および送風機においては $1/4$ in、熱交換器～送風機においては $1/8$ in 以下であるように規定されている。したがつて、管の接続は基礎に主要荷重が載荷されてから 1 年後に実施された。

7. 施工

工事の規模と施工順序を示し、Calder Hall 発電所建設に関して土木工事が占めた役割が判明するように、図—4 に配置を、図—5 に工程を示す。以上に述べたような特殊な構造物を建設するのに、いろいろの注目すべき工夫を加えているので、その中から数例をあげてみよう。

図—4 に示すように、広い敷地にもかかわらず、現場での製作、組立、運搬のために必要な空間は、かなり大きくなるので、圧力容器、熱交換器、導管など、大型のものを運び上げるのに、必要な多数のクレーンは、施工全般の障害とならぬよう、綿密な検討がなされた。図—4 では南から北に向つて、施工が進められた。この図に示されているクレーンは、地上約 26.5 m の遮蔽コンクリート壁を越えて、その中に圧力容器を搬入するために高さ 27 m の鉄塔上に据えつけられた 100 t デリック クレーンであり、その控えロープの長さ約 180 m に達している。建物の配置とクレーンの使用法に関しては、その後 Chapelcross を始め前記三発電所に至つて、いろいろな工夫を行なつている。

黒鉛をいかなる順序で積み上げて行なつたかは不明であるが、精度を合理的に達成できるように十分考慮せねばならない。注意すべき点は、炉心が汚れることは絶対禁ぜられていることである。このため黒鉛は製作後、ただちに包装され、炉心を積み重ねる作業員はすべて清潔な衣服をまとつた。炉心を積んだ後に行なわれた各種の試験では、炉心を汚さぬように通すべき空気はすべて濾過された。

10 コの逆 A 字型支柱に荷重が均一に加わるようにするため、つぎのような方法を実施

した。すなわち、まず外側補強板および腕金を3組のみ圧力容器に仮溶接し、これを完全に鉛直に据えつけた3本の逆A字型支柱に載せ、正しい位置を保つ。このとき他の7組の支柱は少し外側に倒しておく。それから7組の支柱を正しく立て、この上に腕金が密着するように調節を行なつてから完全に溶接する。これが終つてから最初の3本の支柱は一度はずし、さきの7本の支柱の場合と同様な方法により、あらためて容器に合わせた。

圧力容器の底の中心には直径1 in の孔があり、この孔を通して基礎に記された固定中心に向つて下げ振りを降すことによつて、鉛直の保持に役立つ。一方溶接ならびにヒズミ除去による変形、燃料孔と装入手との間の直線性ならびに炉心の清浄さの確保などの点を考えて、圧力容器のヒズミ除去を行なつたのち、圧力容器から一部突出させておいた部分に装入手をつぎだし、最後に黒鉛を積んだ。

生体遮蔽には多数の管が通り、しかも高精度を要求されるので、施工がきわめて困難であるという事実はすでに各方面において述べられているので省略する。ただ屋根の施工に関して興味のある事項をあげるにとどめる。遮蔽屋根は圧力容器および遮蔽壁がすべて完成後に打設された。このときは下からコンクリート型ワクを支持することができなかつた。これ以前に造られた横型の原子炉では、屋根に格子桁を渡し、これから吊り棒を降して熱遮蔽およびコンクリート型ワクを支え、格子桁は埋め殺す工法を採用したことがあつた。しかしながらCalder Hall では屋根に多数の管が通るために、かかる工法は不可能となつた。それゆえ屋根の上部に bailey bridge girder を渡し、これから吊り棒を降して前述と同様な方法を行なつた。屋根コンクリートは4層に分け、1 ft 厚さの第1層が硬化すれば、そのみで第2層の荷重を支持するように設計し、ガーダーおよび型ワクの荷重としては第1層のコンクリートのみで済むようにした。仮設時の荷重によるタワミは計算ならびに実験より求め、あらかじめ型ワクにソリを与えておいた。

8. 構造上の課題とその考察

いままでに述べたことによつて、Calder Hall 発電所の建設にあつて提起された難点とその解決策について、いくぶん明らかになつたことと思う。われわれはCalder Hall 発電所の建設は一つの実験段階にすぎず、設計・施工の演習として眺めるべきであろう。確かに、改良型原子炉発電所は多くの進歩の跡がみられる。構造上の問題点を折にふれて示してきたが、ここでも少し一般的な見地に立つて問題をまとめ、若干考察を加えてみたいと思う。

(1) 概 説

原子炉は運転中のみならず運転停止後も近づくことは

困難であり、その上密閉容器に格納される。したがつてまず第一に原子炉は修理不可能である、という観点に立つ必要がある。原子炉はちようど、化学プラントのように、われわれでは予測できないような条件に、さらされる可能性の多いものであるから、常に各方面と連絡を取り、あらゆる角度から検討を加えて安全なものに造り上げなければならない。

このために原子炉構造に要求される条件として、

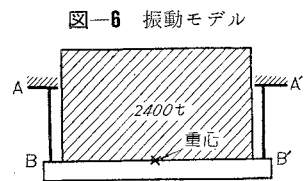
- (1) 寸法精度の高いこと、
- (2) 耐震的であること、
- (3) 温度変化に耐えること、

の三点をとりあげてみると、これらの条件をすべて満足する構造とするのは実に容易でないことがわかる。構造物の剛性を大きくすると熱応力が大きくなる。逆に柔軟な構造とすれば精度を保つことができず、耐震上の難点が生ずることもある。ただ強固な基礎地盤で大地震のおそれが少ない地点であるということは、きわめて好都合である。ゆえに放射能汚染ならびに災害に関する問題をふくめて、上記の立地条件に適する地点をわが国で選定することが、まず第一になされるべきことであろう。しかしながら、この見とおしは明るくないであろう。したがつて合理的な構造形式の研究が要望される。また構造物を、できるだけ地下に設けることも考えるべきであろう。

(2) 耐 震

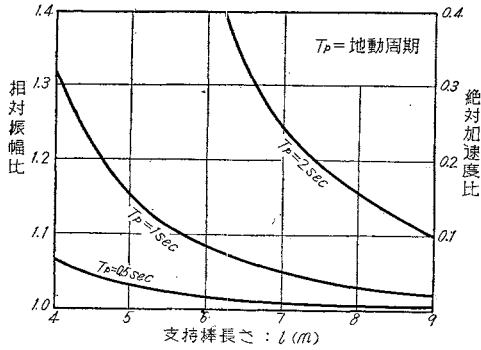
原子力発電所の耐震性を論ずるためには全構造物を含めて考えねばならないし、またさきに述べたように各種の問題が関連することも、もちろんである。耐震構造についてはわが国で独自の立場によつて研究が進められている。耐震、免震いずれの面からも研究されている¹⁾。炉心部に関しては、黒鉛積層体を地震によつて変形も破壊も起させないためには、もし可能ならば免震構造とするのが合理的であると考えられる。

著者等は図-6に示すような簡単な振動系を考えて、定常ならびに過渡振動状態に際してバネ常数(バネとして作用する部材 AB の



寸法と支点 A, B の条件) の大きさ、ならびに制振器の効果がおよぼす各種の影響を検討した²⁾。その結果によれば免震構造とすることは必ずしも不可能ではないと考えられる。炉心部重量 2400 t とし、これを diagrid 周辺において断面 125 cm² の棒 24 本でつる。棒の上下端を固定とした場合には図-7に示すような結果がえられる。地動周期 1 秒の場合を考えると、炉心に加わる絶対加速度を定常振動時に地動加速度の 0.2 倍程度にするには、棒の長さを 45 m くらいにすればよい。炉心に加わる加速度が、この程度なれば、炉心自身の構造は比較的容

図-7 炉心の振動性状 (定常)



易に解決されるだろう。ただ炉心と压力容器の相対変位が大きくなるので、各種の装置の関係上どの程度までこれを許しうるかが問題である。压力容器全体を免震構造とする研究も行なわれているが³⁾、この場合には压力容器に接続する各種管類の許容変位が問題である。

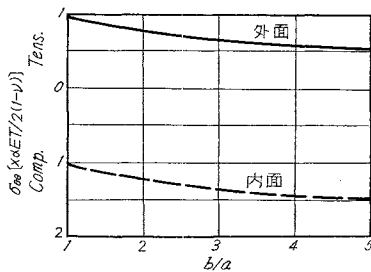
(3) 熱応力

温度変化による応力と変形の問題が随所にかかる。外力の他に温度変化にも耐えるような構造物に関する研究を十分行なわなければならない。たとえば、内径 a 、外径 b の中空円筒において、内面が外面より温度 T 上昇した定常状態において生ずる接線応力は、

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{\alpha ET}{2(1-\nu)} \left\{ \frac{1 - \log b/r}{\log b/a} - \frac{(b/r)^2 + 1}{(b/a)^2 - 1} \right\}$$

によつて表わされる (平面ヒズミ状態)。この式によつて内面、外面の接線応力を示せば図-8 のようになる。この図によれば内外面の応力を同時に減ずることはできず、壁厚を増大する効果が比較的小さいことがわかる。また壁厚の小さいときには、内外面の圧縮または引張り応力が同程度の大きくなる。

図-8 円筒の熱応力



Calder Hall の生体遮蔽は、内面外面ともに多数の鉄筋を2方向に入れて補強した。今後は炉心の温度をさらに200°C程度上昇させるべく研究が進められている。生体遮蔽の外面に生ずる引張応力や、高温に対する処置など、構造上研究を要する問題は多い。また压力容器の支持法、燃料孔装入管、炭酸ガス導管などに対して、温度変化と地震の両者に対処する方策を、詳細に検討する必

要がある。

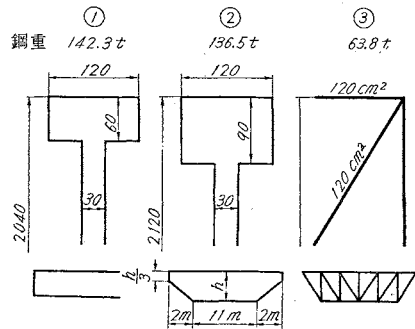
(4) 鋼構造

鋼構造で最も問題となるのは溶接であろう。改良型の出力増大には溶接技術の進歩に負うところが大きい。原子炉構造において生ずる特有の問題は材料の放射線損傷である。一般に鋼材は放射線照射によつて脆性を増し、引張強度ならびに降伏強度を増加する。压力容器の構造に関しては、改良型原子炉の中には二重の球形にしているものもある。一様な内圧に対しては応力ならびに変形の両面ともに球形が最良であるが、これを円筒形にしたのは、燃料装入のために炉心上に一定の空間が必要なためであつた。炉が大きくなれば球形としても必要な空間を確保することができる。

Calder Hall では一定高さの diagrid を用いているが、改良型では周辺部の高さを減じている。これは炉心の位置を下げ、鋼材を制約し、压力容器を小さくしようという考え方ではないかと思われる。そこで、さらに進めて diagrid をトラス構造とすれば、以上の効果のほか下部におけるガス通路が長くなるので、さらに有利ではないかと考えられる。

以上の3種の構造形式に関して著者等が行なつた概算の結果を示せば図-9 のようである。ただし電気出力15万kWの発電所を対象とし、設計条件としては、黒鉛重量2400t、同直径15m、許容応力900kg/cm² (セン断650kg/cm²)、弾性係数1.9+10⁶kg/cm²、最大タワミ1cm、格子間隔1.8m、フランジ幅12cmを用いた。この例によれば、diagrid をトラス構造とすれば、鋼重を1/2程度に減じうる。図に示した断面についてはいろいろ議論はあるが、いずれにしても、きわめて大きい断面寸法のものになるので、実際に作る場合には断面構成法が大きい課題となる。

図-9 Diagrid 型式の比較



(5) コンクリート構造

コンクリートを放射線遮蔽に使用すると、炉からの熱伝達および中性子捕獲によつて温度が上昇する。したがつて温度とコンクリート性質の関係を詳細に研究する必要がある。これには、比重、比熱、熱伝導率、温度拡散

率、熱膨張係数、弾性係数、強度、クリープなど多くの性質を明らかにしなければならない。普通コンクリートに使用する骨材の種類によつてコンクリートの性質がいかに変化するかは、ダムの研究に際して、かなり明らかにされている。たとえば数値の大きい順に並べると、比重は、玄武岩—石灰石—カコウ岩、比熱は玄武岩—石灰石—カコウ岩、温度拡散率は石灰石—カコウ岩—玄武岩となる。

遮蔽効果の観点からは、比重の大きいとともに水素原子の多いことが望まれる。一般に骨材量が多くなれば、比重は増加するが水素原子の含有量が減ずる。したがつて重コンクリート用骨材をはじめ、MOセメントや混和剤の性質ならびに、これを用いたコンクリートの性質に関しても明らかにせねばならない。なお、コンクリートの放射線損傷に関する、くわしい資料は知らないが、いままでのところでは、障害を認められない、ということである。

Calder Hall ならびに改良型においては、生体遮蔽ならびに基礎はすべてマスコンクリートで作られているが、これを薄い部材で組立てることも考えられるであろう。たとえば生体遮蔽は表面をコンクリートとし、内部には粘土その他の材料を充填するとか、さらに場所によりコンクリート品質を変化させるとか種々な方法が考えられる。基礎に関しても cellular type とし、その重量を減ずる工夫についても検討を要するであろう。

9. 結 び

原子力発電所はあらゆる分野の技術の総合成果であり、土木工学者もこれの建設に積極的に貢献しなければならない。このためには原子力発電所の構造特徴を知る必要がある。そのため例を Calder Hall 発電所にとり、その設計・施工における主要特徴を示し、構造上の各種問題について考察を加えた。さらに原子炉耐震化のために免震構造を適用することについて、著者等の計算結果を用いて若干の考察を加え、diagrid の構造についてもトラス構造の利点を指摘した。しかしながら、これらの構造型式が可能であるためには、核工学ならびに装置に関する問題と密接な関連があるので、この方面の研究者と協力して、検討を進める必要性が痛感される。また単に意見を述べたにすぎない問題もかなりあり、これらの点についても十分研究を積まなければならない。

著者等は京都大学において小西、成岡両教授、後藤助教等とともに、原子炉構造についての意見の交換、研究を行ないつつある。本文はこの結果、得られた成果の一部である。

参考文献その他

- 1) 中川恭次：英国型動力炉の耐震設計に関する見解，原子力工業，第4巻，第3，4号（昭33）。
- 2) 丹羽義治・後藤尚男・森 忠次：英国型原子炉の炉心支持法に関する二、三の考察，土木学会第14回年次学術講演会にて発表予定。
- 3) 小堀謙二：コールドー・ホール型原子炉の耐震化について，京大防災研究所年報，第1号，p.92（昭32）。

学会備付図書（国内）一覽（30）

I. 昭. 33. 10. 間に寄贈を受けた分

○南部イタリー開発 第1次5カ年計画（1950—1955年）の成果：法博 鹿島守之助訳（鹿島研究所） ○第2回材料試験連合講演会前刷 昭. 33. 10. 14～15（日本材料試験協会） ○盛工年次報告 昭33年度 鉄道橋梁下部構造の振動性状とその図集（国鉄盛岡工事局） ○溶接棒の研究 No. 2（昭32年度研究経過報告）（日本溶接協会溶接棒部会技術委員会） ○空気防波堤シムボリューム講演集 昭. 33. 2. 18～19（長崎県） ○都市計画：工博 武居高四郎（共立出版） ○新橋梁工学 第1巻：小池啓吉・小池修二（森北出版） ○成層土壌の降下浸透に関する研究 研究の資料と記録 第6集 特輯：山崎不二夫（東大農学部土地改良研究室） ○日本セメントKK研究所要報 192 動力炉におけるコンク

リートの熱成長とその対策に関する研究 原子炉遮蔽用各種コンクリートの熱特性値並びに熱サイクルによる熱成長に関する研究 ○同 193 高温加熱並びに熱サイクルが原子炉遮蔽用各種コンクリートの強度に及ぼす影響 ○化学便覧 新版：日本化学会（丸善） ○日本塩業史（日本専売公社） ○戦後日本塩業史（同） ○創立十周年記念誌（大阪大学工学部構築工学教室） ○室蘭製鉄所50年史 ○東京工業大学附属図書館収書通報第6号 ○東京都管工事工業協同組合員名簿 昭. 32. 8. 1現在 ○同 追補・訂正 昭. 33. 9. 15 現在

II. 昭. 33. 10. 間に購入した分 なし

付記 学会備付図書（国内）一覽(29)は 43—10・p.46 に掲載

土木工学論文抄録	第3集	A4判 230頁	頒価：500円	会員特価：250円（〒70円）
同	第4集	A4判 273頁	頒価：450円	会員特価：225円（〒70円）
同	第5集	A4判 378頁	頒価：1200円	会員特価：800円（〒80円）