



30 MW 改良ガス冷却形原子炉

30 MW Advanced Gas-Cooled Reactor

I. ま え が き

現在英国において、大形ガス冷却、天然ウラン、黒鉛減速形原子炉は国家の動力源の一部として建設されている。この形の原子炉の動力コストは単基容量 150 MWe 以上のもので在来の動力コストに接近してきた。

単位出力当たりの資本費は与えられた炉容積当たりの出力を上げることにより減少させることができるが、そのためにはより高い燃料要素温度が要求される。一方金属ウランの最高温度には冶金学的限界があるので、それに代わるものとして二酸化ウランのような高融点を持った燃料を考える必要がある。しかし金属燃料を使わないことになるとウランは濃縮されなければならない。(訳者注、金属ウラン以外の天然ウラン、たとえば UO_2 、UC などの天然ウランでは連鎖反応を維持することはできない。) このため燃料コストは高くなるけれども、燃料の燃焼度を上げることにより打ち消すことができる。同時に、ガス温度が高くなることにより蒸気条件がよくなり、電気発生装置の効率はよくなる。

このような改良により、出力範囲 20—100 MWe のガス冷却形原子炉を陸用、船用の動力源として設計することが可能になった。これはある地域では在来形プラントと競争できるだろう。以下述べる設備は船用炉から発達した第一段階のものである。

II. 配 置

このプラントの特長は全設備が一つの建物の中に収容されていることで、これにより建設費が節約され、運転が便利になってくる。原子炉部分は発電所の一方の端に位置し、電気発生装置はもう一方の端に位置している。この二つの部分は中央の制御ブロックにより結ばれている。原子炉部分の汚染地域と放射線の危険地域と特別清浄を必要とする地域などへ立ち入る際は充分注意しなければならない。このため原子炉建屋は次の三つの地区に分けられている。

1) 普通の地区、補機装置を収容している場所で、核的害を受けない所。

- 2) 制限地区、原子炉、燃料装荷および制御地区、補助炭酸ガス回路などと新燃料準備用の特別清浄地区。
- 3) 汚染地区、汚染浄化系に関係あるプラント全体、放射性排棄物処理設備、建屋外の一時貯蔵タンクと制御棒捨場のある地区。

建屋の中央には制御室のほかに蒸気リシーバ・ディーゼル発電セット、バッテリー室、スイッチ盤、安全装置、電気通信装置などがある。この場所がコントロールセンタに選ばれたのは便利であることと電線が節約できるということからである。

タービンホールには、30 MW タービン発電機 1 セットとそれに付属した復水器、給水加熱器、ポンプ、水処理プラントなどが収容されている。変圧器はスイッチヤードに面したタービンホールの一方の側にあり、重量物搬入口と修理工場がこのタービンホールの端にあり、修理工場の上には管理設備がある。

燃料取扱設備を含めた原子炉ホールには 1 台のゴライヤス形クレーンがあり、建設の際はこのクレーンが使用され、その後はチャージマシンの運搬とか使用済燃料容器取扱用に使用されている。さらに、このクレーンは、チャージマシンを制御面に運び、そこで制御棒、制御装置のサービス用にも使われている。

III. 設備の主要パラメータ

- 1) 燃料：2.16% U^{235} に濃縮された二酸化ウラン 5,941 kg、燃料要素数は 484、被覆は厚さ 0.25 mm のステンレス鋼で最高設計温度は 693°C である。
- 平均燃焼度：10,000 MWD/t
- 燃料取り換えが平衡に達した時の反応度の温度係数
燃料： $-2.7 \times 10^{-5}/^{\circ}C$
減速材： $+6.0 \times 10^{-5}/^{\circ}C$
- 2) 炉心：3,520 mm (直径) \times 3,353 mm (長さ)
チャンネル数：121
- 3) 圧力容器：板厚 87 mm のけい素キルド炭素マンガン鋼で、5,537 mm (外径) \times 10,850 mm (全長)
- 4) 制御棒と停止棒：

制御棒, 27本(吸収反応度: 18%)
中性子束平坦化棒, 7本(吸収反応度 4%)
停止棒, 23本(吸収反応度 4%)
吸収材: 3% ボロステンレス鋼

5) シャへい材料:

3%ボロン鋼, コンクリートおよびハイドロボ
ード

6) 冷却系: CO₂ 冷却

最高作動圧 28.2 kg/cm²

流量: 318.8 kg/s

炉入口温度 260°C

炉出口温度 538°C

熱出力 100MW

回路圧力降下 2.8 kg/cm²

回路数 2

循環機: 1段遠心式, ギヤー付背圧タービン合
計動力 4 MW

7) 蒸気発生器

寸法: 12,190 mm (全長) × 3,048 mm (内径)

熱伝達面積: 過熱器 516 m², 蒸発器 1,419 m²

エコノマイザ 1,217 m²

8) 蒸気条件および蒸気量

蒸気発生器停止弁後: 63 kg/cm², 480°C

蒸気発生器1基当たり蒸気流量 68,675 kg/h

エコノマイザ入口給水温度 160°C

循環機タービン背圧, 14 kg/cm², 背温 328°C

循環機タービン1基当たり蒸気量 27,700 kg/rh

主タービン背圧, 30.5 mmHg, 湿度 10%

9) 発電機: 最大連続出力 31.5 MW

10) 格納容器:

寸法 18,290 mm (内径) × 15,240 mm (高さ)
板厚 15.9 mm

設計圧力: 3.87 kg/cm²

IV. 安全性

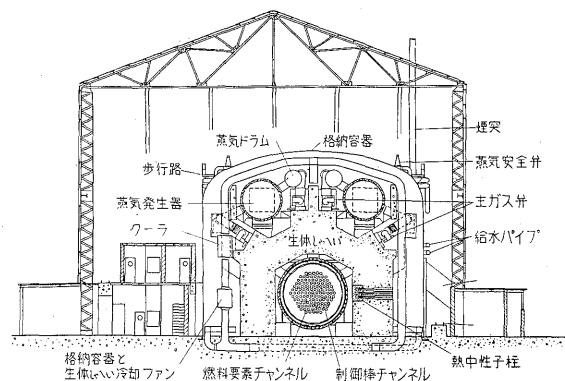
一次循環系は気密の格納容器で包まれている。この容器は一次系が破損した場合のことを考え、初圧を 3.1 kg/cm² にして、最悪の事故の際の圧力に耐え得るように設計されている。燃料の被覆と一次回路は放射能の漏れに対する第一、第二の防壁となる。ステンレス被覆を用いたことにより正の温度係数が小さくなり、安全性に余裕がでてきた。一次回路の周りに格納容器をつけ加えたのは原子炉の可能な事故を考慮した安全性から要求されたものではなく、原子炉の設置に当たって大衆の意見

が大きいから取り付けたのである。

しかしこれは、原子炉設置場所の選択範囲を広げるのに役立っている。さらに地震や台風のような天災にみまわれる地域では特に重大な問題である原子炉外部からくる事故に対しても、安全性において充分余裕を備えている。また格納容器内に CO₂ のふんい気を作ったことにより、一次系が破損した時に燃料や減速剤が酸化するという心配がなくなった。

V. 炉心と圧力容器

この原子炉に使用されている燃料要素は新形 G E C クロスフロー形のもので、燃料カプセルは黒鉛スリーブ内におさめられ炉心を貫いている円筒形のチャンネル中に装荷される。チャンネルは燃料用に 121 本、制御用に 57 本ある。炉は横形になっておりこれにより、燃料装荷面と制御棒操作面を分離することができること、各チャンネルの両端から近づけるということ、一次系のガスの自然循環に好都合であること、格納容器内の配置がコンパクトにできることなどの利点がある。減速材と反射材は六角形断面の黒鉛ブロックで作られ、これはウイグナ効果や地震による荷重に耐えるような構造でお互いにキー止めされている。黒鉛は鋼製シリンダ内に支持され、このシリンダは第1図に示されているように温度こう配を小さくするよう絶縁されている。



第1図 原子炉および原子炉建屋断面
Fig.1. Sectional view of nuclear reactor and its housing

炉心端面のグリッド板はブロックを軸方向に保持し、燃料要素は燃料装荷用スタンドパイプ内のスプリングにより高温端グリッドに固定されている。高温端グリッドの後には高温ガスだめが取り付けられている。これらすべての炉心集合体はグリッド板のブラケットにより圧力容器内に保持されている。原子炉容器は両端面が半だ円

体をした円筒で端面には一つのチャンネル当たり一つのスタンドパイプが取り付けられている。炉心の荷重は、容器に最小の荷重をかける方法により、容器を貫ぬいているサポートでささえられている。垂直方向のサポートは長手方向には剛であるが、横方向にはたわみ性がある。横方向のサポートは水平板に配置された同類の構材からできている。容量は工場で部分的に製作され、現地では二つの境界部分の突き合わせ溶接をすればよいように設計されている。

VI. 一次循環系

二つの蒸気発生器が原子炉容器と平行してその上に取り付けられていて、これらはガスダクトにより連結されている。燃料チャンネルを出た高温ガスは高温ガスだめに集められ、高温ダクトを通過して *SRU* の過熱器部へ導かれる。チューブバンクを通りぬけたガスはチューブバンクと *SRU* セルとの間の環状スペースを通過して循環機に入る。循環機により加圧された冷たいガスは低温ガスダクトを通過して炉心と圧力容器の間に入り、それから炉心部に入るようになっている。ダクトの熱膨張はヒンジ付きベローで吸収されるようになっている。高温ガスダクトは内部が絶縁され、すべて圧力のかかる部分は低温ガスの温度付近に保っている。各ダクトには電気駆動の蝶形弁が取り付けられて、*SRU* は原子炉から隔離できるようにになっている。

1. 循環機

循環機は背圧タービンで駆動され、これは一般に使用されている電気モータ駆動より次の点がすぐれている。

- 1) 各循環機は *SRU* から直接供給される蒸気により駆動されるため信頼度が高い。
- 2) 循環機は速度調整は循環機タービンのしぼり弁を調整することにより都合よく行なえる。
- 3) 電気駆動になっていないため、電気伝達損失やモータ損失がない。
- 4) 資本費の節約になる。
- 5) 原子炉が熱を発生すると蒸気が発生し、その蒸気が循環機を駆動するから原子炉の安全性が高められる。

このタービンは背圧形でここを出た蒸気は主タービンへ送り込まれる。循環機は一段遠心式羽根車で、*SRU* 圧力容器の端に水平に取り付けられている。動力はギヤ箱を通過して伝達される、このギヤ箱の上には原子炉が冷たい時に起動する際、使用されるモータが取り付けられている。羽根車の軸の部分から冷却ガスがもれるのを防ぐために油冷却形の面シールが取り付けられている。

2. 蒸気発生器 (*SRU*)

蒸気発生器は 51.5 MW (th) 定格の半強制循環式の水管ボイラ形で単一圧力系である。水管はエコノマイザ、蒸発器、過熱器からなり圧力容器内の四角形ダクト内に収容されている。これらのチューブバンクを取りはずす際便利のように *SRU* の低温端面は取りはずしのきく構造になっている。この *SRU* はそっくりそのまま現地へ輸送できる大きさのものであるから、すべての組み立ては工場の清浄状態の下で行なうことができ、したがって据付費、建設費を節約することができる。

VII. シャヘイ

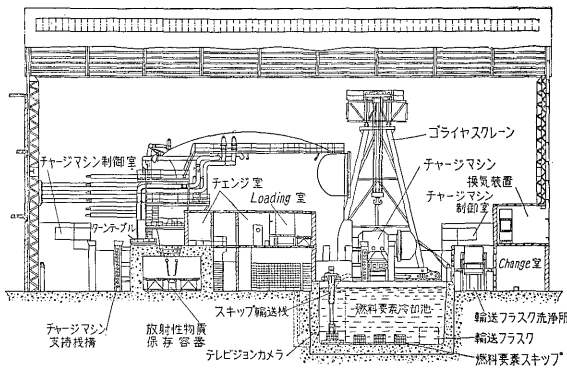
炉心部は 3.2 mm 厚さのポロン鋼で包むことにより圧力容器での中性子捕獲による γ 線発生を少なくし、ガスダクトでの放射線を低くし、またこれにより主生体シャヘイの厚さはうすくてすみ核的加熱は少なくなる。このコンクリート製シャヘイは 2,900 mm 厚さの側壁、2,440 mm の天井、スタンドパイプ部分は、これより少し厚目の壁からできている。*SRU* とガスダクトを包む二次シャヘイは 460 mm のコンクリートとそれに相当する鋼板からできている。このシャヘイ冷却は格納容器内で CO_2 ふんい気を、適当に配置されたダクトに導き水冷却形の熱交換器を通して循環させる方式で行なわれている。これにより格納容器内の機器を満足すべき温度に保っている。また空気の代わりに CO_2 を用いたことにより、アルゴンの放射線化の問題がなくなった。

VIII. 格納容器

鋼製の格納容器は頂部が半だ円体をした立て形の円筒で、低部にはフランジがつけられ基礎ラクトにボルト締めされている。フランジ部はガスケットでシールした後 Expanding concrete を使ってぬり込められている。この中に職員が入れるようにインタロックされたとびらが取り付けられ、特に *SRU* 容器を取りはずす所には取りはずしのきくカバが取り付けられている。循環機タービンとギヤ箱を形成している *SRU* の端部の所には二つの 2,440 mm 径のノズルが取り付けられている。各ノズルは格納容器を貫通して、相互の移動を吸収するメタルベローでシールされている。

IX. 燃料の取り扱い

第 2 図に燃料取扱設備の主要部が示されている。新燃料要素と反射材スリーブは清浄な条件の下で発送される。発電所の燃料取扱室でも同様の条件が要求される。



第2図 原子炉建屋の燃料取扱側断面
Fig. 2. Sectional view of fuel treating side of nuclear reactor housing

燃料は黒鉛スリーブにより組み立てられ、新しく組み立てられたものは、まずストアへ運ばれる。ここではすでに炉に装荷できる状態になっていて、必要に応じてこれらはホストで上の燃料装荷準備室に運ばれ、ここで燃料要素は荷ほどきされ、検査され、真空清浄されてハッチを通して、隣の燃料装荷室へ運ばれ、ここでドラム形の燃料装填マガジンに入れられる。これらの部屋は特別に清浄状態を確保するため、大気圧よりわずかに高い圧力に保たれている。ここへ立ち入る時は local change room を通って行くようになっている。チャージマシンの運転は燃料装填領域の片側にあるローカル制御室から制御される。

このマシンの圧力容器内には二つの同形のマガジンがタンデムに配置されている。原子炉運転中はこのマシンは格納容器の外側で操作されるから、そのマガジンの端はベローでシールされたノズルを持った外側の圧力容器内に収容されている。チャージマシン格納容器の内側には燃料装填用チェン、それを駆動する機構、その位置指示機構などが収容されている。チャージマシン全体は適当にしゃへいされ、これに結ばれている電線とかガスパイプなどはフレキシブルなものが使用されている。チャージマシンはまずゴライヤスクレーンで燃料装填用マガジンの前に移され、チャージマシンのノズルは燃料取り入れ面に取り付けられる。次に炭酸ガスで操作されるチャージチェンのつかみ手が loading magazine 内に押し出され、そこで反射材スリーブをつかみチャージマシンの一つのマガジン中に引き入れる。保守のため器具を取り換える際も同様な操作が行なわれる。

次にチャージマシンはクレーンにより燃料装荷面の支持台の上に運ばれる。ここでチャージマシンノズルとその格納容器ノズルとはきっちり燃料装荷面に取り付けら

れた後、シール用の栓ははずされチャージマシンの格納容器とチャージマシン圧力容器にはそれぞれ空気と CO_2 が満たされ、前者は格納容器の圧力に後者は原子炉の圧力に保たれる。次にチェン機構によりスリーブ、燃料などの取り出し、そう入が行なわれ、この作業中は補助冷却系により冷却されるようになっている。この作業が終了ればマシンは燃料取り出し場所に運ばれ、ここで(マシン内の圧力は大気圧に下げられ)照射物質は冷却池に入れられる。

X. 反応度制御

反応度の制御はステンレスポロン鋼を使ってモータ駆動により行なわれる。この操作の正規速度は 102 mm/min であるが、早いそう入速度のものも備えられていてこれは 10 秒で棒全体がそう入されるようになっている。さらにこれとは別の炉停止用の棒があり、この棒の手前にはピストン頭がついていてシリンダ内におさめられ、ここにはソレノイド弁を通じて高圧ガスが供給されるようになっている。高圧ガスが入ると棒は高速度で炉内にそう入される。また一次系が破損した場合はシリンダ外端の空間のガスが膨張することにより棒はそう入され、自動的に炉は停止される。57本の制御棒の内34本は機械的機構で、23本は炉停止用の圧縮操作機構である。34本の棒はさらに27本の制御棒と7本の中性子束分布平坦化棒とに分けられる。後者は通常そう入された状態にあり、クセノンのオーバライドに対して反応度を調整できるようになっている。制御棒およびその機構は保守のために負荷時にも取り換えるように設計されている。この取り換え作業はチャージマシンにより行なわれる。炉の制御面のすぐ隣には放射性物質の保存設備があり、制御棒機構の取り換えは燃料取り換え作業と同じ要領で行なわれ、これらの操作はローカル制御室から行なわれる。

XI. 原子炉計測器操作

中性子束測定用熱中性子柱は生体しゃへい中に備えられ、冷却剤、燃料、グラファイト、圧力容器、しゃへい壁の温度測定用の熱電対もそれぞれ装置されている。燃料チャンネル一つにスタンドパイプ一つが設置されていることにより燃料の温度、冷却剤の流速、温度、圧力などの測定が容易になった。これら冷却剤のパラメータは冷却回路中の各点で測定され、さらに湿度、一酸化炭素濃度なども記録され、各チャンネルから出るガスは破損燃料検出装置へ採取されるようになっている。

XII. 電 気 発 生 装 置

蒸気条件は在来設備に合わせて 63 kg/cm^2 , 480°C の単一圧力系が選ばれた。タービンは 30 MW 一基である。炉の起動、停止の際使用するダンプコンデンサ装置の容量は炉出力の 10% である。非常時の動力はディーゼル発電機と蓄電池により供給される。後者は供給電力が中断された場合にも機器の動力源として使用される。

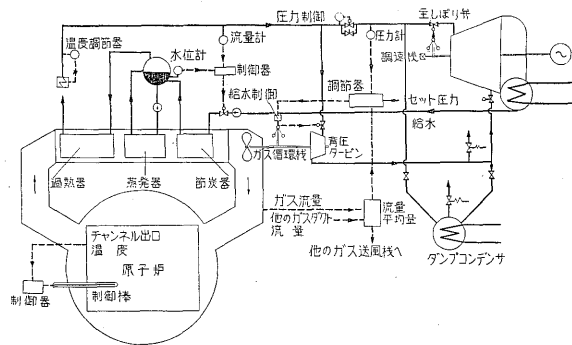
XIII. 運 転

1. 燃料サイクル

この炉は燃料を $2,850 \text{ MWD/t}$ 照射した後、位置変えて使用して燃料寿命が $10,000 \text{ MW/t}$ であるということをもとにして設計されている。燃料サイクルは1日で一番多い時の作業が、1チャンネルの使用済燃料を新燃料と取り換える作業と1チャンネルの燃料を位置変える作業になるように計画されている。燃料サイクルにおけるこれらの作業は毎日行なわれるわけではない。したがって燃料取扱設備の規定の保守は充分行なえるようになっている。

2. 全体の制御

原子炉の動特性は安定である。すなわちたとえ冷却ガス流速が一定の状態でも制御棒が動いたことにより反応度が変化した場合でも、新しい出力でつり合うようになっている。また反応度が妨害された場合には炉心の温度が変わることになり反応度の温度係数の効果でこれとつり合うようになっている。しかし実際には出口ガス温度の変化は望ましくない。したがって自動制御系がなければ燃料の燃焼度、燃料装荷などの変化に対して連続的な制



第3図 蒸気サイクルと自動制御系統図
Fig. 3. Schematic diagram of steam cycle and automatic control system

御棒の調整が必要になる。このためにすべての温度変化を合理的な限界に保つよう、また要求された一定の出力に保つように自動制御系が備えられている(第3図)。炉出口温度を一定に保つための制御は制御棒を動かしたりガス流量を変えたりして行なう。ガス循環タービンへの蒸気供給量はしぼり弁により制御され、またこのしぼり弁は调速機により制御される。この调速機のセット値は調節器からの要求に応じて調節されるようになっている。この調節器に入る入力は実際測定されたガス流速と期待流速との差により生ずる。期待流速は主タービンのしぼり弁の前の蒸気圧測定から得られる。

3. 起動時間と停止時間

炉が臨界に達するまでの時間は制御棒をそう入した状態で炉心が初めに持っている超過反応度の大きさによりきまるが、これは 3% をこえるのは適当でない。これにより棒を引き出す時間は約 30 分かかる。炉が冷たい状態からスタートする時は循環機タービンを回す前にモータで循環機を駆動し全体の系が暖まるのを待つ必要がある。これには約 4 時間を要する。負荷は炉制御系からの制限で $5\%/\text{min}$ 以下で増加されなければならない。かくして全力運転までには 20 分を要する。また原子炉が暖められ、臨界に達していれば(すなわち、通常の停止状態)、全出力運転までの所要時間は 50 分で、全力運転から停止までには 20 分を要する。

XIV. 建 設

この発電所を建設するに必要なピーク時の労働力は熟練工とそうでないものを含めて 350 人が雇用されることになる。発電所が大形機器を取り扱う設備を備えた港からそう遠くない所に建設されるものとして、建設期間は燃料装荷から臨界に達するまでを含めて 31 個月と見積られている。コミッションが終るまでにはさらに 10 週間はかかるだろう。

参考文献

- (1) Hartnel-Beavis, M.C. A nuclear reactor installation for marine use. G.E.C. Atomic Energy Review Vol. 2 No. 2
- (2) Hartnel-Beavis, M.C. The G.E.C. cross-flow fuel element. G.E.C. Atomic Energy Review Vol. 2 No. 2
- (3) Hicks, R. Japan's first nuclear power station—Earthquake problems. Nucl. Pwr. Vol. 5 No. 47 (March, 1960), pp. 108-109

(原書 Atomic Energy Review (GEC) Vol. 2 No. 3
Spring 1960
訳者 原子力部業務課 木下誠人)



*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。