

## 船舶技術研究所における原子力船開発研究の概要

(付, アイソトープ利用の研究)

### 目 次

- 1 船用原子炉工学に関する研究
- 2 船用原子炉の振動動揺対策に関する研究
- 3 原子力船の安全対策の研究
  - 〔A〕 原子力船の遮蔽に関する研究
  - 〔B〕 原子力船機関部材の安全対策に関する研究
  - 〔C〕 原子炉圧力容器の安全対策に関する研究
  - 〔D〕 船用原子炉プラントの制御に関する研究
- 4 原子力船の災害対策の研究
  - 〔A〕 サイトの災害対策に関する研究
  - 〔B〕 衝突予防と救命艇に関する研究
  - 〔C〕 損傷時復原性に関する研究
  - 〔D〕 コンテナ及び周辺構造に関する研究
- 5 原子力船の波浪中運動性能の研究
- 6 原子力潜水商船に関する研究
- 7 高速, 大型原子力船の開発に関する研究
  - 〔A〕 船型に関する研究
  - 〔B〕 船体, 構造に関する研究
- 8 アイソトープ利用による研究及び放射性物質の輸送に関する研究
  - 〔A〕 アイソトープ利用による研究
  - 〔B〕 放射性物質の輸送に関する研究

### は し が き

原子力の船舶への応用研究については, 船舶技術研究所の前身である運輸技術研究所の初期の頃から, その気運が醸成されていた。わが国の原子力利用研究は昭和31年の原子力委員会の発足を契機として急速に拡大し, 既にその頃から原子力船開発研究の必要性が提唱された。

運輸技術研究所においては, 昭和31年に原子力船研究室が設けられて調査研究が開始された。その後引き続き研究を拡大発展し, 研究室も増加された。

昭和38年4月1日, 運輸技術研究所を改組して船舶技術研究所が設立されるに際し, 原子力船の開発研究を重要研究課題として取上げ, 3研究室をもつ原子力船部, 2研究室をもつ東海支所(茨城県東海村)が設置されて, 原子力船の開発研究は一層強化され現在に至っている。

また原子力船開発研究は, 民間においても熱心に行われていたが, 昭和38年度に原子力船事業団が設立され, 官民合同で原子力船第一船の建造に着手することになって, 原子力船の開発研究も新たな段階を迎えることとなった。

しかしながら, 原子力船の開発研究は奥深く, 将来に託されている問題も少くない。ここに運輸技術研究所から船舶技術研究所にわたる研究経過及び船舶技術研究所における将来計画について概観を行なうこととした。

### 1. 船用原子炉工学に関する研究

(研究経過)

昭和31年, 運輸技術研究所に原子力船研究室が設置されると共に, 我々は船用に適すると思われる加圧水型, 沸騰水型, ガス冷却型の3種の原子炉の調査研究を開始した。

昭和32年初頭から7月迄, 原子力船調査会において原子力タンカーの試設計を共同で行なつた際, 当所はガス冷却型原子炉の班と沸騰水型炉の班に参加し, 前者の班では炉の核設計とガスタービンプラントの設計を, 後者の班では核設計の一部と安定計算及び遮蔽設計を分担した。

昭和34年, 日本原子力研究所に動力試験炉が設置されることとなり, 昭和35年4月から当所の研究員を動力炉建設室に派遣して, 同炉の設計建設に協力した。

又当所の一色技官及び高田技官が昭和34年度及び35年度に米国キヤムデンに派遣され, 同地で建造中のサバナ号の調査を行なつた。

小型経量で熱効率が高く将来船用として有望視されるものの一つとして, 炉心内で過熱蒸気を発生する

沸騰水型原子炉の可能性と問題点の解明を行なった。  
又軽水炉の如くコンパクトな炉心格子で、燃料棒間の相互作用が、高速分裂効果 $\epsilon$ の表示に自然に含まれる理論を導く研究を行なった。

#### (研究成果)

原子力船調査会において共同試設計を行なった原子力タンカーについては、ガス冷却炉班の設計結果は黒鉛減速、炭酸ガス冷却型原子炉で、常用熱出力 51.1 Mw、炉心直径 4.5 m、高さ 4.3 m、ガス圧力 32.2 kg/cm<sup>2</sup>、燃料は UO<sub>2</sub> 丸棒不銹鋼被覆冷却ヒレ付 944 本、濃縮度 5% であつた。沸騰水型原子炉の班で担当した高速分裂効果の計算値は 1.0497 であつた。担当した炉プラントの安定計算の結果は位相余裕 100°、ゲイン余裕 35 db で、この試設計の炉は十分安定であることが判つた。又遮蔽設計の結果は一次遮蔽として鉄 5 cm、鉛 10 cm、鉄コンクリート 100 cm、二次遮蔽として鉄 45.5 cm、コンクリート 70 cm を要することとなつた。

過熱沸騰水型原子炉に関する研究は、先ず中空円筒型燃料棒の外側で沸騰して生じた蒸気を内側で過熱する単一領域型式のものを検討した。そして所望の出力で成るべく炉心を小さくすることを目標にして設計する場合に、核的及び熱的に定められる炉心半径の範囲と、安定及び所要過熱度の判定から、適当な燃料寸法を決定する図表を作成した。次に熱中性子領域の沸騰部と高速中性子領域の過熱部とからなる 2 領域型式のものについて研究した。

蒸気流速、出力密度、過熱度等の観点から、濃縮度が非常に高い場合は過熱部を外側にした場合が実現性があり、濃縮度を下げると過熱部が内側でも外側でも実現性があるけれども、内側の方が熱的に望ましいことが判つた。

この様に核的特性の異なつた領域を組合せた原子炉では、安定と制御が重要な問題なので、この様な系の運動方程式を立て、臨界条件、反応度、逆時間公式等を導く研究を行なった。

船用原子炉は、船の運航の制約により burn up (バーンアップ) を高くする必要があるので、燃料棒中に補獲される中性子の割合即ち Neutron blackness を求める式を導き、これを利用して high burn up 後の熱中性子利用率を求める方法を開発した。

動力試験炉建設に対する協力については、当所員の 1 名が原研所員と共に昭和 36 年末にサンノゼに派遣さ

れ、動力炉の運転実習を行なつて来た。

又建造中だつたサバンナ号の調査の結果は、詳細な資料を原子力船研究協会から各関係者に配布した。

#### (問題点)

この項目に挙げた研究は、振動動揺対策に関する研究や遮蔽に関する研究と異なり、特に大規模な実験を要するものではなく、蓄積した各種の技術を基礎として行つて行く、いわば調査研究的性格のものであつたから、技術的にさしせまつた問題点と云うものは無いが、当所としてはこのような研究の分野を拡大したいと考えている。

#### (今後の計画)

原子力船の建造が現実の問題として討議されるに至つた現在、当所としては原子力船の安全性に直結した問題に主力を注ぎ、振動動揺対策や遮蔽の研究の外に例えば事故推定、燃料交換、廃棄物取扱等についても研究を進める計画である。それと共に将来の発展を考えて長期的研究もゆるがせには出来ない。例えば船体運動を考慮した原子力船の遠隔操作の研究や、ガス冷却原子炉による単一サイクルプラントに関する研究等にも着手したい。

又最近諸外国において船用の新型式炉の試設計案、例えば IBR. UNIMOD. 630 A 等が相次いで発表され、それらの開発が将来の原子力商船時代を築く可能性も考えられるので、この様な新型式炉の調査研究にも早急に着手するつもりである。

#### (研究発表)

- (1) 40,000 重量トン、20,000 馬力ガス冷却型機関部設計書、原子力船調査会報告書、昭和 32 年 8 月
- (2) 40,000 重量トン、20,000 馬力、沸騰水型機関部報告書、原子力船調査会報告書、昭和 32 年 8 月
- (3) 原子力船資料、運輸技研資料 No. 9、昭和 33 年 7 月
- (4) 原子力船サバンナ号に関する資料、昭和 34 年 9 月
- (5) 黒鉛減速ガス冷却型原子炉について、運研研究発表会、昭和 31 年 11 月
- (6) 軽水加圧水型原子炉について、運研研究発表会、昭和 31 年 11 月
- (7) 沸騰水型原子炉について、第 1 回原子力シンポジウム、昭和 32 年 1 月

- (8) 船用ガス冷却型原子力機関の原子炉について、  
運研研究発表会，昭和32年11月
- (9) 船用ガス冷却型原子力機関のガスタービンにつ  
いて，運研研究発表会，昭和32年11月
- (10) 船用原子力機関の沸騰水型原子炉について，運  
研研究発表会，昭和32年11月
- (11) 過熱沸騰水型原子炉の試算，運研研究発表会，  
昭和34年11月及び第1回原子力研究総合発表会，  
昭和35年2月
- (12) 積分型輸送方程式の解法及びその応用例につ  
いて，運研研究発表会，昭和35年11月
- (13) 二領域過熱沸騰水型原子炉の試算，運研研究發  
表会，昭和35年11月
- (14) 格子型の高速分裂効果，運研研究発表会，昭和  
36年11月
- (15) 過熱沸騰水型原子炉の試算（第2報），第2回  
原子力研究総合発表会，昭和36年2月
- (16) 散乱を含む不均一断面積燃料棒の中性子透過問  
題について，第2回原子力研究総合発表会，昭和  
36年2月
- (17) 過熱2領域炉の中性子束変化，第3回原子力研  
究総合発表会，昭和37年2月
- (18) 高速効果と格子系の相互作用中性子束の関係  
第3回原子力研究総合発表会，昭和37年2月
- (19) 長期燃焼を行なった燃料棒の Neutron Black-  
ness  $\beta$  の一表示，日本原子力学会誌 Vol. 4  
No. 4. 昭和37年4月
- (20) Green 函数による 原子炉中性子束の 時間空間  
的記述日本原子力学会38年会，昭和38年4月
- (21) Green 函数による原子炉中性子束の 時間空間  
的記述(II)，日本原子力学会第3回炉物理分科  
会，昭和38年9月
- (22) Multiregion Reactor Kinetics Equations  
Based on Region Fluxes Report of Trans-  
portation Technical Research Institute  
No. 58. March '63
- (23) 高温固体の Debye Waller factor と微視散  
乱断面積日本原子力学会38年会，昭和38年4月
- (24) 散乱を含む燃料棒の high burn up 後の熱中  
性子利用率について，日本原子力学会39年会，昭  
和39年4月
- (25) 非均質炉の高速効果について，第2回船研研究  
発表会，昭和39年5月
- (26) 長期燃焼後の熱中性子利用率，第2回船研研究

発表会，昭和39年5月

## 2. 船用原子炉の振動動揺対策に関する研究

(研究経過)

原子力船が波浪等によつて振動動揺を受けたい、最も重要な影響を受けるのは原子炉およびその補機であり、とくに水冷却原子炉においては、炉内に自由水面および気泡等を有しているため、大きな振動動揺を受けたときの影響とその対策については安全性の面より十分検討されねばならない。

とくに我が国の周囲の海域は、台風や低気圧等によつて極めて荒い海域が多く、原子力船が荒天に遭遇する確率は極めて高いので、世界のどの国よりも振動動揺対策を重視する必要があると思われる。

当所においては、まず昭和33年度に高サイクルの振動および20°までの低サイクルのローリングを与える振動動揺試験装置を設置し、昭和37年迄に二次遮蔽体の耐振動試験および、JPDRの1/2断面模型による水力学的振動動揺試験を行なった。まず前者においては機械的構造に対しては比較的容易に振動に強い構造をとらせることができることがわかった。

後者の実験においては、流路内に気泡(ボイド)が存在しているときには、傾斜したときにボイドが一方に集中してその点の燃料棒の焼損(バーンアウト)熱負荷を下げる危険があること、また上下加速度を受けるとボイドの性質が変つて流れが不安定になり、やはりバーンアウト熱負荷を下げるのではないかということが観察された。

この試験により、水冷却原子炉に対してはとくに上下方向の加速度と傾斜による影響が重要であることがわかったが、前記の振動動揺試験装置だけでは上下方向加速度の振巾が小さすぎ、かつサイクル数が過大であつたので、船舶の上下揺れ(ヒービング)に対応する長振巾低サイクルの上下動揺を発生できる小型上下動揺装置を試作して、二重管式小型原子炉水冷却水路模型(自然循環、高さ1m)をのせ、それに対する影響を研究した。

初期のうちは機械的不備のため大きな加速度を得られなかつたが、昭和38年度に至つてようやく60kgの荷重に対し±1.1g、振幅6.4mのヒービング動揺状況を実現することができ、そのときの水路の状況の観察とバーンアウト熱負荷の計測を行なった。

その後更にその小型水路模型に強制循環ポンプを取りつけて強制循環を行ない、そのさいの観察と計測を行なった。

#### (研究成果)

- (1) 原子炉の機械的構造に対しては、従来のプラントがそうであつたように、船の振動動揺に対しては、適当な補強、支持構造、ダンパー等を加えることによつて比較的容易に対策が構じられる。

ただし大きな配管の振動に対しては個々の場合に応じた対策が必要である。

- (2) 水冷却原子炉に対する振動動揺の水力学的、熱力学的影響は考えられていた以上に大きい。それを個々に述べると

(a) 船のヒービング運動によつて上下方向に低サイクルの周期的加速度を受ける水冷却ループでは、そのバーンアウト熱負荷が上下加速度変動量に比例して直線的に減少する。その量はちょうど静止時の熱負荷限界を1とすると、 $\pm 1.0g$ の上下加速度が加えられると熱負荷限界は1/2となつてしまう。

このように熱負荷が減少するのは、上下動揺によつて流路内に水力学的不安定現象に似たボイドの大巾の脈動が発生するからである。

そして特に重要な実験的事実は、この熱負荷低下現象は、BWRのように常時多くのボイドを有しているときでも、また改良型PWRのように常時は極めて僅かなボイドしか有していないときでも、全く同様に生ずることである。

- (b) 上の実験は自然循環水路で行なつているが、その後強制循環実験を行なつた結果入口流速が0.8 m/s くらいまでの強制循環でも全く同じ熱負荷低下現象が生ずることがわかつた。
- (c) また水冷却原子炉が上下動を受けているときはその炉内の時間平均ボイドが静止時よりも増大し、かつ出口側に集中するので、動揺時の出力を維持するためには制御棒をそれだけ多く抜いた状態で運転しなければならぬので、自動制御の面ばかりでなく、核計算や燃料のバーンアップへの影響が考慮されなければならない。
- (d) 傾斜したときの影響については、まだ定量的実験が完成していないが、やはり上下動の影響と同じように、ボイドの片側集中の影響によるバーンアウト熱負荷の低下が問題となることが

考えられる。

#### (問題点)

以上述べたように、小型実験装置によりとくに上下動揺および傾斜によつて水冷却原子炉 (BWR, 改良型 PWR) の熱限界が極めて大きな影響を受けることがわかつた。

この事実は、将来の原子力船の原子炉の種類を選定荒天時や台風時の海上における実船での加速度の測定等の研究に重要な関連を持つものであり、また問題を水冷却原子炉に限るときは、船の上での原子炉の位置の決定 (船首、または船尾近くでは上下加速度が大きい) に重要な関連をもっている。

#### (今後の計画)

さらに具体的な水冷却水路部分に対する影響対策の研究としては

- (1) 以上の研究は主として小型 (高さ1 m) 常圧の実験装置によるものであり、今後更に大型かつ高圧の模型についても実験を行い、かつその精度を上げるための測定器を搭載する必要より、さらに大荷重の上下動揺試験機を新設して研究を進展させる。
- (2) 熱負荷の低下を防ぐため、静止時に対しては、すでに実験している旋回流方式の水路に対する上下動揺の影響を調べ、この方式の船用 BWR に適用できる可能性を検討する。
- (3) 傾斜による水路内のボイドの片側集中効果に関する定量的、系統的实验を行なう。
- (4) 配管、制御棒、駆動機構、自動弁、計器、重量、遮蔽支持構造等の耐振動動揺性に関しては原子力船第一船に関連する具体的な事例が現れた際振動動揺台施設を活用してその対策研究を行なう予定であるが、そのため、既設試験機の改良特にデータ記録処理系の改良を行う必要がある。

#### (研究発表)

- (1) 振動動揺台について  
振動動揺試験装置について  
運研研究発表会 昭和34年11月
- (2) 原子力船の二次遮蔽構造体の振動試験について  
運研研究発表会 昭和36年11月
- (3) BWR の炉心内流れに対する傾斜と上下動の影響の研究、第3回原子力総合発表会、昭和37年2月

- (4) 上下加速度を受けるときの沸騰伝熱の研究  
運研研究発表会 昭和35年11月  
第3回原子力総合発表会 昭和37年2月
- (5) 旋回流における沸騰伝熱の研究  
運研研究発表会 昭和35年11月  
第3回原子力総合発表会 昭和37年2月
- (6) 沸騰水型原子炉の安定性  
第1回原子力シンポジウム 昭和32年1月
- (7) 沸騰水型原子炉の安定性について  
第1回原子力シンポジウム 昭和32年1月
- (8) 強制循環沸騰水型原子炉の動特性について（第1報）  
運研研究発表会 昭和34年11月
- (9) 自然循環沸騰水型原子炉の動特性について（第1報）  
運研研究発表会 昭和34年11月
- (10) 沸騰水型原子炉の水力学的不安定について  
第10回応力講演会 昭和35年9月  
第2回原子力総合発表会 昭和36年2月  
第3回原子力総合発表会 昭和37年2月
- (11) 試作ボイド計について  
運研研究発表会 昭和36年11月
- (12) 2次系補機の動特性について  
運研研究発表会 昭和34年11月
- (13) 上下動揺をする沸騰水ループの熱限界実験について  
原子動力に関する講演会 昭和39年3月  
日本機械学会 講演会前刷
- (14) 二相流における細線のバーンアウト  
39年5月 日本伝熱シンポジウムにおいて発表予定

### 3. 原子力船の安全対策の研究

#### 〔A〕 原子力船の遮蔽の研究

##### （研究経過）

高度の安全性を保ちながら、原子力船の機能や経済性を害ねない放射線防護構造を研究して、炉運転時、作業時、事故時における乗員、乗客および作業員、一般公衆の放射線に対する安全性を確保するのが目的である。

昭和31年度から文献調査により始められた研究は、以下の経過を経て遮蔽実験用原子炉の建設および原子力船安全対策研究用電子計算機の設置に至り、原子力第一船の建造期を迎えて研究成果の具体化を行なおうとしている。便宜上項目を分けて述べるが、各々は独立のものでなく、相互に関連して研究が行なわれてき

た。

#### (1) 実験的研究

船用炉の遮蔽体は軽量化のため、船底方向などの遮蔽を軽減ないし省略することがあり、また構造が複雑なため放射線の散乱の影響が著しい。このため当所の実験的研究は、まずガンマ線の散乱の研究から始められた。

昭和33年度  $\text{Co}^{60}$  を線源とし、鉄、鉛、木材、コンクリートからの散乱ガンマ線の測定。

昭和34年度 新たに製作した遮蔽実験用タンクを JRR-1 の実験孔に接して置き、水中での炉心ガンマ線の散乱透過を研究した。

昭和35年度  $\text{Co}^{60}$  および  $\text{Cs}^{137}$  を線源として、鉄板、コンクリートからの後方散乱ガンマ線のエネルギースペクトルを測定した。これにより散乱線量率の物質による影響が明らかになった。

また、シンチレーションカウンタによる中性子とガンマ線の識別についての実験的研究を行なった。これは特に原子炉を線源とする遮蔽実験に有力な測定手法となる。

昭和36年度 散乱ガンマ線量を減少させる目的で物質表面を鉛板で覆った場合の効果の研究した。

#### (2) 遮蔽実験用原子炉の調査研究

昭和32年度より、遮蔽実験用原子炉の必要性、炉型式出力、設備について調査した結果スイミングプール型原子炉を適当と認め、昭和33年度、34年度、35年度、36年度の当所要求予算として取り上げた。昭和35年度、日本原子力研究所に JRR-4 として設置し、協同使用とする旨合意を見たので昭和36年度より JRR-4 建設室に研究員を派遣して計画、建設に協力している。

米国 ORNL に出張中の職員によつて、スイミングプール型原子炉による遮蔽実験法の調査、特に高速中性子のスペクトルおよび角分布の測定法の調査研究を行なった。また、米国ペンシルバニア州立大学に出張中の職員によつてスイミングプール型原子炉による遮蔽実験の調査研究を行なった。

#### (3) 解析的研究

実験的研究の成果を一般化し、原子力船の放射線安全評価と遮蔽設計法を確立するため、解析的研究を行なつてきた。この目的には膨大な量の計算を伴うので、電子計算機の利用が不可欠である。

昭和31年度 文献調査。

昭和32年度 原子力船調査会において、沸騰水型

原子炉を搭載するタンカーの遮蔽設計を担当した。

昭和33年度、34年度、大型電子計算機、IBM 704 による中性子束分布の3組み分けによる計算コードを開発し、ついで、中性子束および1次、2次ガンマ線分布を電子計算機によつて解析する方法を研究した。

昭和35年度 中型電子計算機による中性子束計算コードを開発し、小数組み分け解析に用いる常数の決定法の研究を行なった。

原子力船の遮蔽体、原子炉系機器、船体構造（甲板、隔壁、タンク等）をすべて考えに入れて、原子力船の船体内外での任意点における放射線強度を算出するコードを開発した。（MARINE-1 コード）

昭和36年度 原子力船の安全対策の研究に使用する電子計算機が設置せられることとなつたので、放射線の安全解析に必要な計算機性能を考慮して、国産の電子計算機（NEAC-2206）を設置した。

昭和37年度 NEAC-2206 電子計算機に対する MARINE-1 コードを開発した。

昭和38年度 MARINE-1 コードに用いる $\gamma$ 線の斜入射に対するビルドアップ係数は、鉄、鉛用の近似計算を除いて、各国とも所有していない。

応答マトリックス法を新たに開発して、その結果の一部として、これら必要な常数を得られる様にした。

放射線の平板輸送方程式を直接積分によつて解く方法（EOS）を開発した。厳密に近い解が得られるため、応答マトリックス法のみならず他の解法の標準解となる。

#### (4) その他（工学的研究）

昭和34年度 日本原子力船研究協会と協力して、サバナ号の2次遮蔽体と類似の構造物によつて鋼構造物への鉛板、ポリエチレン板の取り付け方法の試験を行ない、さらに当所の振動動揺台において振動試験を行なった。

### (研究成果)

#### (1) 実験的研究

空気中および水中での散乱ガンマ線の諸性質が明らかになり、炉系からのガンマ線の、船体構造または周辺の水による散乱の評価に使用できる資料が得られた。

例えば、コンクリートは遮蔽特性が優れ工作も容易であるが散乱線量が比較的多く、約半数の光

子が散乱し、エネルギーにして約10%に達することが確かめられた。また表面を0.5~1.0mmの鉛板で覆うと散乱ガンマ線量は著しく減少するがそれ以上の厚さでも効果に違いはなく、3mmでも5cmと大差ないことがわかつた。

以上の実験に用いられた実験技術は、今後の同種の実験ならびにJRR-4における実験に利用できる点が多い。

#### (2) 遮蔽実験用原子炉の調査研究

当所で調査検討してきた遮蔽実験用の諸施設はJRR-4に備えられることになつた。なかでも大型実験孔を有し、十分な遮蔽を施して大線量の実験を可能にした散乱実験設備（仮称）は世界で最初の設備であつて、JRR-4で取り上げられたが、同炉の特長の1つとなつた。

また海外において、スイミングプール型原子炉を利用する遮蔽実験に参加、調査した結果はJRR-4での実験方法ならびに計測法の開発に寄与するものである。

#### (3) 解析的研究

安全評価法の開発 MARINE-1 コードは、多くの遮蔽体、構造材を考えに入れて原子力船船体内外の放射線強度を迅速に算出するコードであり原子力船の放射線安全評価ならびに遮蔽体の軽量化の研究に有力な手段となる。

昭和38年度においては、造船技術審議会、原子力船安全部会の作業の一部として、MARINE-1を用いて、原船協試設計船の事故の場合の、原子力船内外での直接被爆線量の計算を行なった。

現在、日本原子力船開発事業団よりの要請によつて第1船の2次遮蔽体の予備設計に、協力している。（当所計算機ならびにMARINE-1を使用）

遮蔽設計法の開発 大型および中型の電子計算機を用いて、合理的な時間で遮蔽体内での中性子の減衰を算出する方法、およびそのための諸定数の決定法を求めた。これらは、原子力船遮蔽の設計に使用できる。応答マトリックス法はそれ自体 $\gamma$ 線の多重層遮蔽設計に使用できる。

またこれによつて求められた斜入射 $\gamma$ 線のビルドアップ係数および、多重層ビルドアップ係数は数表として利用することができるよう整備を進めている。

水、アルミ、鉄、鉛について整備しているが、コンクリート、ポリエチレンについても計画中である。

これらは、多重層についての実験結果および他の理論計算の結果をよく表現できることがわかった。

直接積分法 EOS-1 の結果は、実験値として一致することが確かめられた。

この両者、特に前者の計算結果は、原子力船での線量率分布計算コード MARINE-1 で、そのまま使用されている。また開発中のコード MARINE-2 もこれを使用することになっている。計画中の MARINE-3 では、応答マトリックス法をコードの 1 部として組込む予定である。

複雑な形状の遮蔽体の評価 船用遮蔽の如く複雑な形状の遮蔽体の評価をするため、実験結果を参照しながらモンテカルロ法による検討を行なっている。

#### (4) 工学的研究

2次遮蔽体模型について、鉛、ポリエチレン板の取り付け工法、常温および加熱時の耐振性についての知見が得られた。

その他、遮蔽材の性質、船体構造との適合性、積荷やタンクを利用する遮蔽法、事故や火災時の対策、機関部と船室配置の関係などについて文献や試算による調査が行なわれ、安全評価ないし第 1 船設計に有用な資料が得られた。

### (問題点)

#### (1) 実験的研究

実験的研究は JRR-4 によるものに重点が置かれるが問題点の主なもの

測定技術の開発、実験計画、サンプルの取扱い測定法など。

測定器の開発、整備、水中用測定器、効率のよいスペクトロメータの開発など。

人員の確保 研究全般について云えることであるが、特に原子炉での実験では、大型サンプルの取扱い、測定点が多いため準備、測定、資料整理などで多大な人員を要する。

関連施設の整備 JRR-4 の炉室内では大型サンプルの準備や実験後の処理のためのスペースがないため準備用の建屋を要する。

#### (2) 解析的研究

解析法の開発 放射線安全評価ならびに遮蔽設計を合理的な手数と時間で解析する方法を、実験による結果を十分とり入れてなお改善する余地が

あろう。JRR-4 が使用可能となれば飛躍的發展が期待できる。

複雑な形状の船用炉遮蔽体では、モンテカルロ法による解を利用する場合も多いが、その能率化ないし他の解析法との結びつきに研究の余地がある。

計算機の能率向上 現存設置されている電子計算機は、本体としては優れた性能を持っているが結果のプリント時間が遅く、このため計算機の利用効率を抑えられている。

原子力第 1 船の 2 次遮蔽体の予備設計に MARINE-1 コードが全面的に使用されているが、その計算時間の 95% 以上は、中間結果を紙テープにパンチし、再び読込ませるための操作時間である。

これは磁気テープを使用することにより避けることのできるトラブルである。また自動プログラム方式を適用できる附属品（磁気テープおよび高速印字機）がないため、プログラム法の教育に長期を要し利用者が限られる。これを改善して、計算機の利用効率の向上と、広く研究者が利用できる態勢を整える必要がある。

#### (3) その他

具体的な原子力船の設計が進み、また放射線の安全対策の研究が進むにつれて非常に広い分野にわたって多くの問題点が生じてくる。

例えば

特殊遮蔽材料の研究

機関部と船室の配置

プラントの研究

船体構造と遮蔽体との適合性

船体構造と遮蔽能力

積荷やタンクの利用

遮蔽材の工作、加工法

耐振、耐動揺性

火災、事故時の対策

原子力船完成後の試験法

など挙げるにいとまがない。

これらの研究の総合として、遮蔽の最適化の研究があるが、端的な結論を得るのはかなり難かしい。

### (今後の計画)

原子力船の安全性を確保するため、安全評価の方

法を確立し、将来建造され、または来航する原子力船の安全評価が行なえる様な技術的な裏付けと、原子力船のための安全基準を作成し、または改訂するための技術的な資料を提供したい。

以上の目的を達するために、放射線安全解析の研究を実験的ならびに解析的に行なう。この研究は、安全評価のみでなく軽量で安全な原子力遮蔽構造の設計にもそのまま適用できるものである。

以上項目別に計画の概要を述べるが、これらは相互に独立なものではなく、関連して行なわれる。

#### (1) 実験的研究

RI を線源として、放射線の散乱やダクトからの漏洩などの研究も継続して行なわれるが、主力は、実船を用いて RI 線源からの線量率分布を測定して、MARINE-1 コードの計算を検討すること並びに JRR-4 を利用する実験に向けられる。

主な実験項目は

放射線の散乱の研究

実船による線量率分布の研究

船用炉に利用される遮蔽構造に対する放射線の透過散乱の研究

船用炉遮蔽材料の研究

などで、目的によつて分類すると

安全評価法、設計法を開発するための研究

設計された遮蔽体の評価のための研究

とに区分される。

実験に先立つて、実験法および測定器の開発を行なう。

#### (2) 解析的研究

MARINE-1 コードをさらに改善して、原子力船の全体的な放射分布の評価のための解析体系を確立する。このためには39年度に行なわれる実船を使用しての実験的研究の成果も取り入れると同時に、遮蔽体における中性子およびガンマ線の透過散乱を計算するコードを整備する。

現在開発に着手しているものとしては、2次遮蔽体表面からの散乱線を考慮に入れた MARINE-2 コード、および多重層効果を組み入れた MARINE-3 がある。

斜入射ビルドアップ係数および多重層ビルド、アップ係数を資料として、整備し公表して広く利用できる様にする。

以上何れも当所の電子計算機によつて、一貫して処理できるようにしたい。

ただし、現在の当所設置の電子計算機は、本体としての性能は非常に優れている (IBM 7070 相当) のに対して、附属装置の整備が未了であるので利用効率が十分発揮されていない。

このため以下のような整備をして、原子力船の安全評価の計算の中心としたい。

これらの整備については、現在当所との共同研究で、原子力第一船の2次遮蔽体の予備設計を行なっている外来研究者からも強く要望されている。

高速印字装置の整備、現在の計算機の利用時間の大部分は、プリントの時間である。例えば  $\gamma$  線の透過シミュレーションの1ヒストリーの演算時間は 0.2~0.3 秒であるのに対して、プリント時間が22秒を要する。これが高速印字装置によれば 0.5 秒となる。

磁気テープ装置、磁気コアの整備、これらの整備の効果は種々あるが、最大の効果は原子力船内外での線量分布計算コード MARINE-1 の計算時間の飛躍的な短縮と、これをさらに改善した MARINE-2 および 3 が利用可能となることである。同時に、FORTRAN 相当の自動プログラム方式が利用でき、一般研究者が容易に計算機を利用できるようになることである。これによつて、所外の原子力関係者の協力や利用も容易になるし海外で開発された中型以上の計算コードを扱うことが可能となる。

#### (3) その他工学的研究等

今後、この方面の研究はますます増大すると考えられる。特に原子力船の建造ないし来航が具体化するにつれて、様々な問題が生ずるであろう。当所としては、在来からの調査的研究を進めると同時に、個々の提起された問題に対処できる体制を整えておく。

前述の問題点の項で列挙した問題の他にも

船内外の放射線モニタリング

放射性廃棄物の処理

燃料交換等の作業時の安全確保

など、多くのしかも重要な研究、調査課題がある。

以上、将来の計画の研究課題のすべてを当所のみで調査研究しようとするものではなく、関係各省庁、研究所、民間会社、開発研究団体と協力して行きたい。



## (研究発表)

- (1) 各種遮蔽材からのガンマ線散乱の研究  
第2回原子力総合研究発表会 昭和36年2月
- (2) 水中に導かれた核分裂ガンマ線分布について  
第2回原子力総合研究発表会 昭和36年2月
- (3) 水一金属層状遮蔽体内の中性子束分布の1計算法  
第2回原子力総合研究発表会 昭和36年2月
- (4) シンチレーションカウンタにおける中性子とガンマ線の識別  
第2回原子力総合研究発表会 昭和36年2月
- (5) 原子力推進タンカー BWR 機関部設計書  
原子力船調査会報告 昭和33年
- (6) 後方散乱ガンマ線のエネルギー分布の解析  
運輸技術研究所報告 第11巻第12号
- (7) シンチレーションカウンタにおける中性子とガンマ線の識別  
原子力研究所報告 第15号
- (8) 原子力遮蔽計算コードに関する研究  
日本原子力船研究協会報告 第21号
- (9)  $\gamma$ 線の背面散乱について  
第18回運研研究発表会 昭和34年11月
- (10) 船用原子力機関のコンパートメント式遮蔽について  
第18回運研研究発表会 昭和34年11月
- (11) 水中における分裂ガンマ線の線量測定  
第20回運研研究発表会 昭和35年11月
- (12) 原子力船の遮蔽計算コードについて  
第20回運研研究発表会 昭和35年11月
- (13) 遮蔽体内の中性子束計算法について  
第20回運研研究発表会 昭和35年11月
- (14) シンチレーションカウンタによる中性子とガンマ線の識別  
第20回運研研究発表会 昭和35年11月
- (15) 原子力船の二次遮蔽構造体の振動試験について  
第20回運研研究発表会 昭和35年11月
- (16) 2組および3組わけによる遮蔽体内の中性子束計算コード  
第22回運研研究発表会 昭和36年11月
- (17) 遮蔽体の散乱ガンマ線の解析  
第22回運研研究発表会 昭和36年11月
- (18) 放射線の透過散乱問題における応答マトリクス  
日本原子力学会38年年会 昭和38年4月
- (19)  $\gamma$ 線のボルツマン方程式直接積分コード 06-NIOBE-G について  
日本原子力学会38年年会 昭和38年4月
- (20)  $\gamma$ 線後方散乱における表面鉛層の影響  
日本原子力学会38年年会 昭和38年4月
- (21) 原子力船における線量率分布計算コード MA-RINE について  
日本原子力学会38年年会 昭和38年4月
- (22) 遮蔽理論における中性子の取扱い(総合報告)  
日本原子力学会第3回炉物理分科会  
昭和38年10月
- (23)  $\gamma$ 線の Boltzmann 方程式直接数値積分改良コード 06 NIOBE-G 2  
日本原子力学会第3回炉物理分科会  
昭和38年10月
- (24) Boltzman 輸送方程式の数値積分解法による $\gamma$ 線平板問題の解析  
日本原子力学会39年年会 昭和39年4月
- (25) しきい反応法による中性子の測定  
船舶技研報告 Vol.1 No.1 昭和39年1月
- (26) Use of Response Matrix Method for Multilayer Shield Design  
3rd. Geneva Conference 昭和39年8月  
(その他省略)

## 〔B〕 原子力船機関部材の安全対策に関する研究

## (今後の計画)

原子力船機関の一次系には、炉体の他弁類、管系、熱交換器、循環ポンプ、浄水装置等種々の付属機器がある。これらは設置後に補修することが困難であるにもかかわらず、危険防止の面から長期にわたり損傷或は漏洩が絶無でなくてはならぬ。このため合理的で精密な検査が必要であるが、原子力船機関のこれらの検査は運輸大臣が施行することになっており、検査規準の資料を求めるための基礎研究を政府機関において進めておく必要がある。

これら機器の損傷及び漏洩等は、温度と内圧及び外的力が主因となつて発生すると考えられるが、これらの共通の基礎的問題を解明すると共に当初においては使用箇数及び問題点の多いバルブ類を主研究対象とする。

バルブ類の問題点は使用材料のクリープ及び取付時の外力による変形に起因する損傷又は漏洩、グランド部焼減による漏洩、異種金属間の腐食による損傷等である。何れも艤装当初には問題とならず使用時間の経過と共に発生する問題であり、設計形状と共に使用材料に対する考慮が大きな比重を占めることになる。

従つて、次のような諸項に対する研究を行う必要がある。

1. 高温バルブ用材を対象としたクリープ試験
2. 実体バルブに対する熱及び内圧の繰返し負荷を与えた場合の耐久試験
3. グランドパッキング材の焼減の系統的試験
4. バルブ類の腐食試験

当所にはこれまでバルブ試験装置を設置して、主として小型バルブ類の蒸気通過及びそれに伴う現象の調査研究を行つて来たが、更に、原子力船を対象としたバルブ類の漏洩等の問題点の根本的な研究を進める必要性を認めている。

### 〔C〕 原子炉圧力容器の安全対策に関する研究

(目的) 研究は原子炉圧力容器における

- (i) 製作時における溶接欠陥あるいは構造上の不連続部よりの亀裂発生事故。主として脆性破壊。
- (ii) 使用時における溶接欠陥あるいは構造上の不連続部よりの疲労亀裂発生事故。疲労亀裂が容器壁を貫通した際には漏洩事故。
- (iii) 使用時における溶接欠陥、構造上の不連続部あるいは疲労亀裂よりの脆性破壊発生、伝播事故。

圧力容器の破裂事故。

の防止対策の確立を目的としている。(i)の事故は現実にフランスにおいて発生し、大きな経済上の損失と原子炉の安全に対する不安感を招いた。この事故の対策としては適切な鋼材、溶接材料、施工法を選ぶとともに妥当な非破壊検査法を確立し、施工と検査とを並行して進めることが必要とされる。(ii)の事故は圧力容器構成各部材の疲労強度に基づいて行われる圧力容器の強度設計とも密接な関係を持つている。超厚鋼板部材の疲労強度、特に溶接欠陥と疲労強度の関係、小型試験片により求められた疲労法則の超厚板部材への適応性の問題等は、緊急に実証を要する課題と言える。(iii)の事故は最近の中性子脆化の工学的研究の結果からその危険性が指摘されたものであつて、当所では実物と同等の厚さの鋼板および溶接継手を用いて脆性破壊試験を行い、これらの脆性破壊特性を明らかにする。この研究は特に原子力研究等における中性子脆化に対する小型試験片による基礎的研究と密接に協力して進めることが必要である。

以上の各試験研究を通じて最近各方面より指摘されている原子炉圧力容器に対する不安感を合理的に排除

(254)

し、その安全性を確保することがこの研究の目的である。

(研究経過)

15 Mev ベータトロンおよび 4,000 Tcm テストリグは計画通り昭和38年3月に完成し、3,000 Ton 変動荷重装置も昭和40年1月に完成する予定である。以下これらの3装置における経過について述べる。

(1) ベータトロンによる研究

原子力船に使用される原子炉の圧力容器の溶接部その他大型バルブなどの製造品等には内部に欠陥を含む可能性があり、これらに起因する事故を防止するための非破壊検査法確立の研究は非常に重要である。

昭和37年度に設置された、15 Mev ベータトロンは高エネルギーX線を発生するため、原子炉などの厚鋼板用に最適であり、その透過写真撮影能力は鋼板厚が5cm~35cmの範囲に及ぶ。又従来の放射性同位元素の透過装置と比べると線源の大きさも比較にならない位小さいので焦点による幾何学的なばけもほとんどない。

この15 Mev ベータトロンを使用して、検査像の鮮鋭度及び解像力低下の原因である、前方及び後方散乱線の低減方法ならびに欠陥の識別能と濃度との関係を調べることにより透過写真検査方法の確立に関する研究を行なつた。

(a) 前方及び後方散乱線の研究

放射体の内部で散乱された前方散乱線とフィルムの後方の壁などから散乱されて来る後方散乱線の散乱の状況を詳しく調べることにより、これらの散乱線の低減方法を確立する実験を行なつた。

前方散乱線

- (イ) 被射体の厚さと散乱線の強度の角度分布
  - (ロ) 照射面積の差による散乱線の強度変化
- 後方散乱線
- (イ) 散乱体の種類による、散乱線の影響
  - (ロ) 散乱体のフィルム間距離による、散乱線の影響

(イ) 鉛遮蔽板の厚さによる、散乱線の影響

(b) 透過度計識別度による写真撮影方法の研究

透過写真の良し悪しは、透過度計識別度により決める。(a)の実験の結果、実用上さしかえないう程度の散乱線の状態で透過度計識別度により、ベータトロン写真撮影方法について、以下の各々を求める試験研究を行つた。

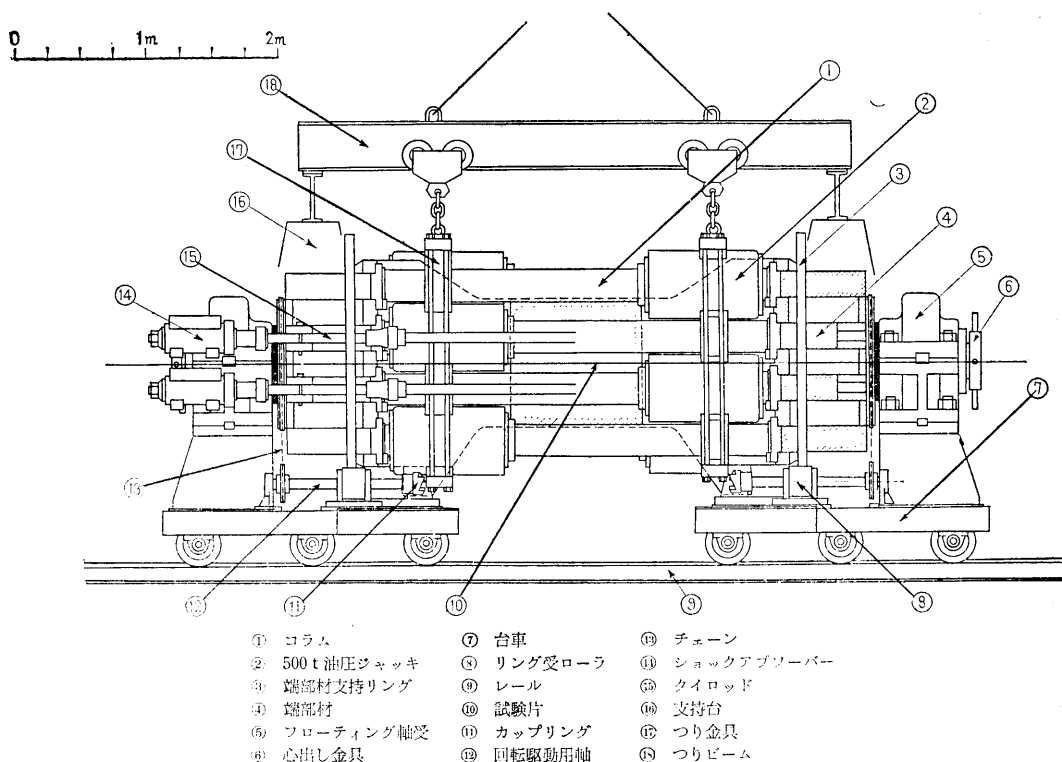


図 3-1 テストリグ側面図

- (イ) 最大X線エネルギーと識別度との関係
- (ロ) 被射体の厚さと識別度との関係
- (ハ) 増感紙の種類と識別度との関係
- (ニ) 写真濃度と識別度との関係

(2) 4,000 Ton テストリグによる研究

4,000 Ton テストリグ昭和 37 年度 原子力予算により製作した最大引張力 4,000 Ton の脆性破壊試験用の装置であつて、昭和38年 3 月完成した。その側面図を図 3-1 に示す。

同装置およびベータトロンを使用してまず日本原子力発電(株)よりの依頼による東海発電 1 号炉の压力容器用鋼板および同溶接継手の亀裂伝播試験を実施した。試験材は压力容器ダクト部の開口のため切り取られた容器鋼板および溶接継手部そのものであつて、压力容器内に収納されて、完成压力容器と全く同様な熱履歴が与えられている。

その試験結果において素材の平坦温度型亀裂伝播試験により求められた亀裂阻止温度は $6^{\circ}\text{C}$ であり、これは英国における同種鋼板の焼準状態での試験成

績と比較しても優れた部類に属する。なお溶接継手は温度勾配型試験結果において素材よりさらに $6^{\circ}\text{C}$ 低い優れた亀裂阻止特性を示した。

その後、302B 鋼板についての試験研究は

(i) 素材の亀裂伝播試験

平坦温度型および温度勾配型伝播試験

(ii) 溶接熱影響部における亀裂の発生および伝播試験

縦継手および横継手試験片

(iii) 各種溶接欠陥よりの脆性亀裂発生試験

スラグ巻込、溶込不足、横割れ試験片

の順で逐時実施されている。

(3) 3,000 Ton 繰返変動荷重装置による研究

(原子炉压力容器等の溶接部の寿命に関する研究)

溶接継手の強度によつて必然的に総合的な強度が支配され、しかも定常状態の荷重に加えて繰返変動荷重が加わる原子炉压力容器にあつてはいわゆる低サイクル疲労の観点から原厚試験片を用いた広範な実験研究を実施する必要がある。さらに超厚板であ

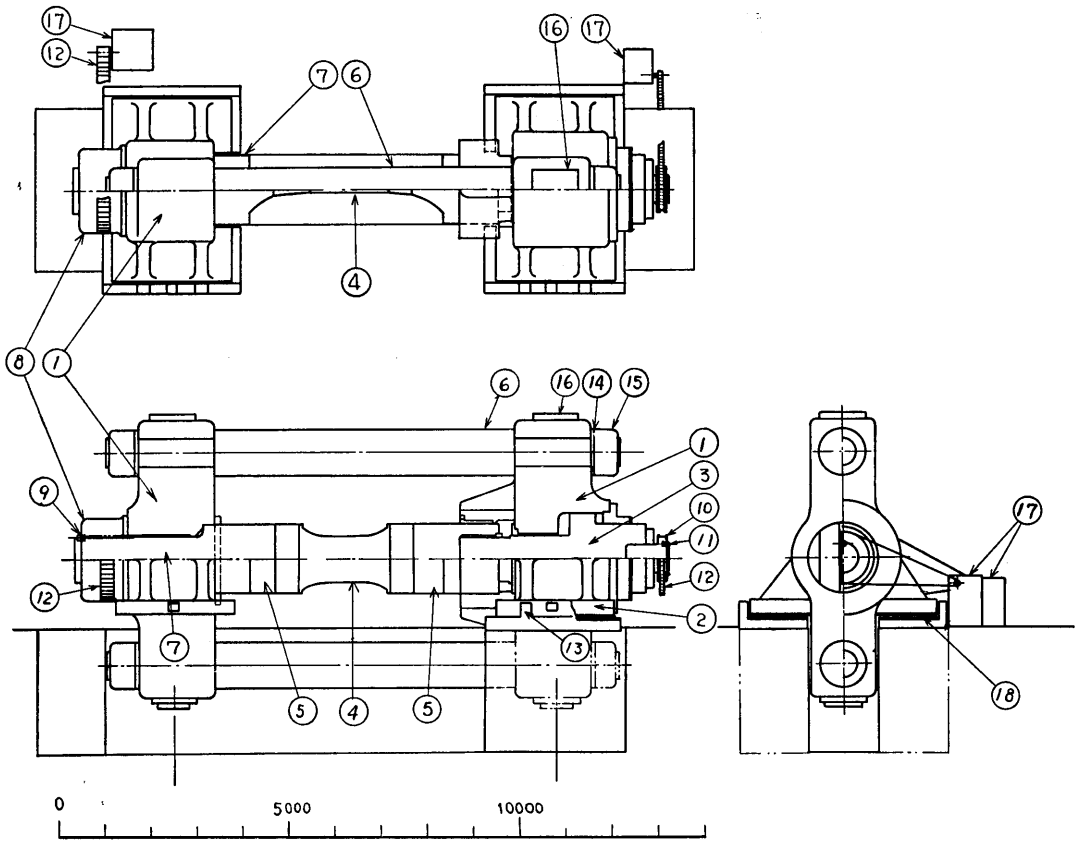


図 3・2 3,000 Ton 繰返変動荷重装置本体

番号	品名	個数	番号	品名	個数
1	荷重ブロック	2	10	プーリー	1
2	支持台	4	11	コッター	2
3	3,000Ton~1,000Ton 往復動ジャッキ	1	12	チェンベルト	2
4	試験片		13	ストッパー	8
5	荷重板	2	14	ワッシャー	4
6	コラム	2	15	ナット	4
7	シャフト	1	16	コラム押え	4
8	ナット	1	17	回転動力源	2
9	コッター	1	18	スチールボール	

るという特殊性から溶接欠陥の潜在を避けにくいことを考慮して低サイクル疲労強度の見地からの溶接欠陥許容度を早急に確立し、よつて原子炉压力容器が安全性と経済性の妥協点に立つて災害発生の懸念なく使用されるいわゆる安全寿命をあらかじめ算定する必要がある。

以上の観点から超厚鋼板あるいは同溶接継手の低サイクル疲労強度を研究するための、3,000 Ton 繰返変動荷重装置が昭和38, 39両年度にわたつて設置されることとなつた。

本装置の設計仕様書は、昭和38年6月27日に開催された「ベータートロンおよび4,000Ton、テストリグの利用に関する連絡会(第2回)」、で検討され、本装置ならびに本装置による試験研究に関連して、次のような要望がなされた。

- (i) 油圧系統の容量を増して繰返速さを上げること。
- (ii) 荷重スパンはなるべく大きくとること。
- (iii) 3,000 Ton 繰返変動荷重装置による試験研究と平行して模型容器の繰返内圧による低サイクル疲労破壊に関する試験研究の実施体制をはかること。
- (iv) 試験能力の向上化、ひいては研究年次計画の短縮化をはかること。
- (v) 原子炉压力容器等の疲労に関する研究項目の広範化(原寸以外の試験片による研究も必要)をはかること。

これらの要望を可能なかぎり満たすため装置の設計は全面的に再検討された。従来の疲労試験機の最大容量は本荷重装置の1/15 200 Ton 程度であり、したがつて国内はもとより国外にもその例を見ない特殊性から、設計上いくつかの問題点に逢着したが4,000 Ton テストリグによる経験、大容量の静的荷重装置に関する文献、数千トン容量のプレス機械に関する調査などから、荷重装置本体、および油圧系統への設計が次第に固められた。一方、既存の15 Mev ベータートロンを用いた透視法、立体撮影法あるいは将来計画としてトモグラフィ断層撮影法によつて、試験中の疲労亀裂の進展状況を観察する際に必要となるシールド水槽の有効厚さを定めるため、同ベータートロンヘッドの漏洩線量分布の測定が行われた。

結局、荷重装置および付属装置の仕様書は、昭和38年11月に完成し、同年中に日本製鋼所に発注され

た。装置の完成は昭和40年1月末に予定されている。

3,000 Ton 繰返変動荷重装置本体の概要は、図3・2の通りである。1対の荷重ブロックは、2本の上下コラムによつてほぼ剛に結合されており、片側の荷重ブロック中央に組み込まれた油圧ジャッキのシリンダー先端に結合された荷重板の縁と、反対側の荷重ブロックに結合されたシャフトと一体をなす荷重板の縁とに試験片が溶接される。

油圧ジャッキのシリンダー往復動によつて試験片に引張(最大3,000 Ton) - 圧縮(最大1,000 Ton)の繰返変動荷重が与えられる。

試験片と荷重板の突合せ溶接はスラグ溶接によるのを原則とするか、場合によつては、自動または手溶接でも行いうる。溶接のための開先加工その他を容易とするため、試験片、荷重板、ジャッキシリンダー、シャフトは一体となつて、あるいは左右単独に回転させることができる。

図3・3は、油圧制御回路系統図である。油圧系統は、補給ポンプ(PF)→主油圧ポンプ(PV)→(アキュムレーター)→サーボ弁→インテンシファ

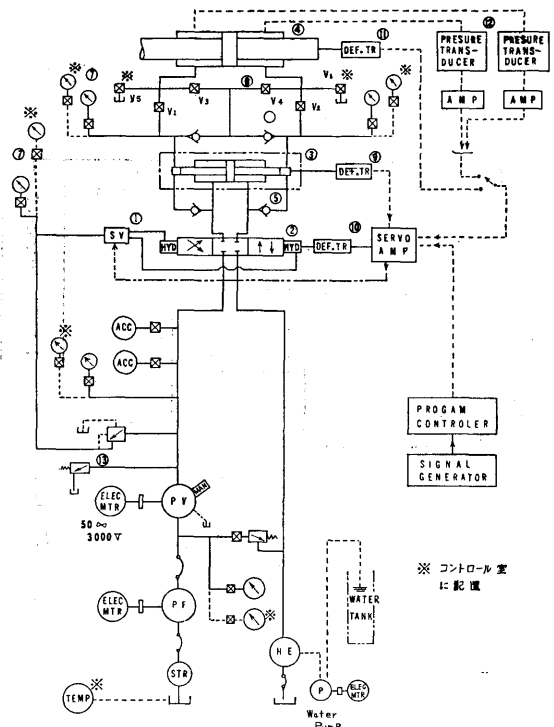


図 3・3 油圧回路および制御系統概要図

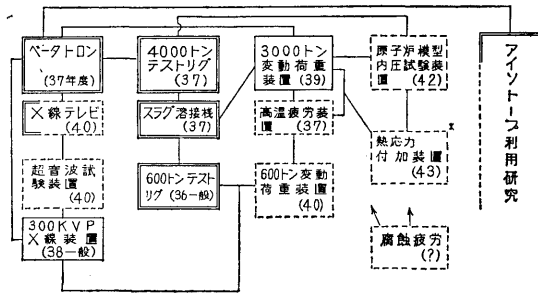
イヤー→油圧ジャッキを主体とし、これにサーボアンプ、弁類ならびに函数発生器とプログラムコンローラーなどが付加する。

本荷重装置の主要機能は次の通りである。

- 繰返変動荷重範囲： -1,000～+3,000 Ton
- 最大振幅荷重： 3,000 Ton
- 繰返変動荷重波形： サイン波、三角波、台形波および変形波
- 制御方式： 切換により荷重制御あるいは変位制御方式で作動
- 荷重繰返速度： 5～60 c/min
- 最大ストローク： 静的200 mm, 動的30 mm
- プログラミング： 3段以上の重複繰返荷重を1ブロックとして試験片破壊までnブロックの繰返しを自動的に行う。
- 標準試験片寸法： 2,000 mm(長さ)×1,500 mm(最大幅)×100mm(厚さ)
- 取付可能な平板型試験片の最大寸法： 3,000 mm(長さ)×1,500 mm(幅)×200mm(厚さ)

(今後の計画)

本節の研究を実施するための主要試験装置の設備進捗状況を図3・4に示す。



注1    既設  
   確定  
   予定  
( ) 内の数字は設備年度

注2 —特に深い相互の関係を持つ装置を結ぶ。  
\* この装置を設備した段階で原子炉の実験条件(始動、スクラム等を考慮した)が再現可能となる。

図 3・4 主要試験装置の設置進捗状況

15 Mev ベータトロン (37年度既設)  
4,000 Ton テストリグ ( " )

(258)

- 3,000 Ton 繰返し変動荷重装置 (38, 39年度製作)
- 600 Ton テストリグ (36年度既設)
- 300 KVP X線装置 (39年購入)

が既に設備された。あるいは本年度中に設置の決定した、主要試験装置である。これら各装置の機能を充分發揮させ、所期の研究目的を達成するために

- X線テレビ装置
- 600 Ton 変動荷重装置
- 超音波試験装置

の3装置を急ぎたいと考えている。X線テレビ装置は3,000 Ton 変動荷重装置による試験実施中溶接欠陥等より疲労亀裂の拡大してゆく状況をベータトロンを使用し観測するためのものである。これにより溶接欠陥等に起因する疲労破壊の寿命を亀裂発生前と発生後の伝播過程とに分離することができ、さらに伝播拡大の挙動も観察できる。超厚板試験片では内部における亀裂の拡大を鋼板の表面状況の観察から推測することは殆んどできないので、この方法の採用は3,000 Ton 装置による試験に際して是非必要なものである。

600 Ton 変動荷重装置は50 mm 程度以下の厚さの試験材を対象とし、低サイクル疲労試験を実施するためのものである。この装置によれば3,000 Ton 装置による場合より遙かに容易に多数の実験点を得られるから、この装置による試験を併せて実施してゆくことによつて、高価な3,000 Ton 装置による試験研究を著しく有効にすることができる。またこの試験結果は従来の小型試験による結果と3,000 Ton 装置による結果との中間の点を補うことにもなる。

超音波試験装置はベータトロン、一般のX線装置等の放射線透過検査において最も弱点であると言われていた亀裂状欠陥を検出するための装置である。強度的に最も悪影響を与えるこの種欠陥の原子炉各溶接継手における正確な検出法を確立することは緊急に必要な課題と行うことができ、超音波装置、ベータトロンの特性を充分活用してこの方策を検討したい。

さらに次の段階における研究として原子炉模型による内圧試験が挙げられる。4,000 Ton テストリグ、3,000 Ton 変動荷重装置による試験研究は試験片厚さにおいては実際原子炉圧力容器と同等のものを採用していると言えるが、加えられる荷重の性質においては遙かに単純である。このため原子炉の大型模型を疲労破壊、さらに脆性破壊させて、4,000Ton, 3,000Ton 装置の試験結果との比較検討を行いたい。内圧を加え

る外、熱応力条件、腐蝕条件等を実際原子炉の場合に近づければこの実際的研究をさらに有意義とすることができる。

#### 〔D〕 船用原子炉プラントの制御に関する研究

(経過)

昭和34年度来船用原子炉として最も重要であると考えられてきた水冷却型原子炉の水力学的不安定現象について多くの理論的、実験的研究を行い、それが二相流の抵抗特性に基く非線形共振であることを確め、この研究結果によつて安定なる BWR, PWR の設計が可能となつた。ついで BWR の動特性の基礎となる二相流の動特性を実験的に電気加熱モデルを用いて決定し、更に同じ装置によつてボイリング雑音の統計的性質を測定解析し、原子炉雑音の研究との関連において原子炉の安全性の研究を行なつた。

一方これからの原子炉プラントは、ますます複雑化されてくるので、どうしても完全自動化が必要となる。この自動化の研究の第一歩として二次系としての蒸気プラントの自動発停を既設の高圧蒸気発生器を対象として、デジタル計算機によつて行う研究に着手した。

(研究成果)

沸騰水型原子炉炉心水路の単独静止ループにおける理論および実験の結果、入口水温度及び熱負荷のある範囲で水力学的不安定による脈動が生ずるがその安定限界、振動数、振幅等は流路の形状、圧力抵抗によつて理論的に計算できることを明らかにした。

二相流の動特性としてパワー・ボイド伝達関数、フロー・ボイド伝達関数を決定したが、これによつて沸騰水型原子炉の動特性の最も解析困難な部分を実験的に決定出来て、安定問題を解析出来るのみならず、その統計的性質の測定結果によつて BWR の原子炉雑音の定性的説明の一助にすることが出来た。

また二次プラントの自動化については現在、起動準備、出力上昇、手動自動切換え、モニター等のフローチャートを完成した。

(問題点および今後の研究計画)

現在の船用炉の制御の研究については、以上のように静止した原子炉に対する各部の動特性の実験的理論的研究は一応完成したので、今後は大きな上下動を受けた場合との関連について調査する必要がある。

また今後の自動制御問題としてはプラントをシステ

ム全体として如何に最適に制御するかという方向に進む必要がある。

これは即ち計算機によるシステム制御である。

これを大きく分けると

- (i) 原子力船の無人化のための研究
- (ii) 原子力船の最適操船問題の研究

の二つになる。

(i) は更に、自動化と無人誘導の項目に分けて考えることが出来る。自動化についてはテストプラントについての実験遂行と共に将来の原子力船を対象とした自動化の可能性の机上検討を行う。

無人誘導の目的とするのは原子力船の港湾内の運航を絶対安全にするため、レーダ、又は超音波による自動操舵運転方式を確立することである。

(ii) は、原子力船の緊急事態において最適の操船と機関の運転を行つて安全を確保するための集中制御方式の研究で、これらの研究には模型船とプラント、シミュレータ、計算機を含んだ大規模な実験施設の設置が必要である。

(研究発表)

- (1) BWR の水力不安定について  
運研英文報告 59号
- (2) 二相流の統計的性質の測定  
昭和38年4月 原子力学会年会
- (3) 二相流の動特性の測定  
昭和39年4月 原子力学会年会
- (4) JRR-4 の動特性の測定  
昭和39年4月 原子力学会年会

## 4. 原子力船の災害対策の研究

〔A〕 サイトの災害対策

(経過)

原子炉の立場から見て、原子力船が陸上炉と甚だしく異なる性格はその移動性である。しかも原子力商船は、その運航上の要求により人口稠密地帯に接近せざるを得ない。従つて原子力商船は、その設計、建造に当り技術的に万全の安全対策を立てると共に、万一の事故に際してもサイトの災害を事実上ゼロにする様な措置を講じておかねばならない。そのために昭和37年秋から、原子力商船の出入港時を主な対象として、万一の事故の場合のサイトの災害評価を行なう研究を開始した。

## (研究成果)

昭和37年秋、日本原子力船研究協会に安全規制小委員会が設置された際これに参加した。

同協会の試設計第1船の事故を想定し、格納容器と原子炉室による二重格納と考えて沃素の吸入による被爆線量を計算し、3才の幼児の甲状腺に対して150remの線量となる距離を、気象の型、風速、燃料熔融率、格納容器漏洩率、被爆時間等をパラメーターとして算出した。計算結果は日本原子力船研究協会安全規制報告書に記載されている。

昭和38年、造船技術審議会原子力船安全部に第5分科会が追加設置され、原子力船の安全審査のためにサイトの災害評価を更に詳細に行なうこととなつたのでこれに参加した。

現在事故時の被爆のもととなる線源の計算、並びに格納容器及びフィルターを線源とした場合の船内の直接被爆線量の計算を、当所のNEAC-2206電子計算機を使用して行なっている。線源計算のコードは現在迄に次のものが完成した。

- (i) いろいろの出力履歴に対応する放射能内蔵量の計算
- (ii) 換気系の作動しない場合に、炉室からもれ出る放射能の計算
- (iii) 換気系の作動する場合に、スタックから放出される放射能の計算
- (iv) フィルターに蓄積する放射能の計算

直接被爆線量の計算は、既に当所において開発したMARINE-Iコードを使用して行なっている。

例えば格納容器内に分裂生成物がとじこめられた場合の被爆線量を、事故時に何らかの作業を要すると思われる場所10点を選んで計算した結果、主蒸気弁における線量が最大で、2千時間被爆で16.6レントゲン次に制御室が2レントゲンとなつた外は皆1レントゲン以下となつた。

原子力船の入港に際し、停泊に先だつ相当前から出力を絞つてやれば分裂生成物の内蔵量を減らせるから事故時の災害規模は小さく出来る。そこで分裂生成物内蔵量を最小にする様な入港時の出力曲線を決定する問題を解析的に解いた。その結果災害評価に問題となる核種の半減期が短い場合には、出力履歴は有効に利用出来るが、然らざる場合にはこれに大きな期待を寄せることは出来ないことが判つた。

一般に事故時の被爆線量の計算の内、汚染雲による直接被爆や汚染雲の地上沈着による被爆は、簡単なた

めその点の汚染雲が半無限空間に様に拡散しているとして求めている。しかしこれは過大に見積りすぎるので、英国気象庁方式で拡散するとした場合との比である減少率を、任意の位置で求められる計算コードを作製している。

## (今後の計画)

災害評価のための計算コードについては、今後浄化系、廃液貯蔵槽の放射能を対象とするものを追加し、さらに空中拡散と海中拡散による被爆を計算するコードを作製する。

発煙点に船体を考慮に入れた汚染雲の拡散の情況は英国気象庁方式やサットンの式で表わされるものとは相当異ると言われているにもかかわらず全く不明である。又事故時の船内の汚染空気濃度分布の問題も重要であるが全く見当がつかない。その他にも原子力工学の知識のみでは手がつけられない数多くの問題が残っているが、順次着手する計画である。

## (研究発表)

- (1) 安全規制小委員会報告書 原船協一38  
日本原子力船研究協会 昭和38年6月
- (2) 入港時のF.P.内蔵量を最小にする船速について 日本原子力学会39年会 昭和39年4月  
第2回船研研究発表会 昭和39年5月
- (3) 原子力船の安全評価のための計算コード  
第2回船研研究発表会 昭和39年5月
- (4) 有限な拡がりの汚染雲による被爆線量について  
第2回船研研究発表会 昭和39年5月

## (B) 衝突予防と救命艇に関する研究

## (今後の計画)

原子力船に対しては、衝突予防法等の法的規制の面においては一般の船舶と異なる扱いを受けるものではないと考えられるが、自主的に衝突防止装置を備えることは当然の措置であろう。

衝突予防の対策は普通船舶と異つたことは考えられないが、一層の安全を期する意味において、従来商船では行われていなかつた水面下の障害物に対する衝突予防のためソーナーを利用することについて、40年度より3ヶ年の計画で研究を実施したい考えである。

## 衝突予防用ソーナーについて

水面下垂直方向の状況判断の手段として超音波による測深儀はすでに実用化され、一般船舶において航海



保安用や魚群探知用としてその機能を発揮していることは周知の事実である。

この探知方向を水面と平行方向まで拡大し、周辺の浮遊物、固定障害物や他船舶との衝突による事故の発生を未然に防止する可能性が議論されている。水面下水平方向に発射される超音波は屈折現象があるので、(水温や密度の疎密に起因する)受信した信号は測深の場合と異なり真の方向または距離を指示、或いは記録しないことが考えられる。

理論的にもある程度算出することができるが有効到達距離と関連してこれ等の問題点を明らかにし、解決方法の資料を得るために適当な船舶による実船試験を行う必要がある。

つぎに何らかの原因によつて火災、衝突、坐礁、沈没等不測の事故に遭遇し、同時に放射能漏洩も起つた場合、本船から乗組員が放射能に対する安全性を確保し乍ら急速に退避するのに適当な特殊救命艇が要望されるものと考えられるので、原子力船の遮蔽、タンカー用特殊救命艇の試作研究等の経験を活用して40年度より3ケ年の計画で原子力船用特殊救命艇の試作研究を行いたいと考えてある。

### 〔C〕 損傷時復原性に関する研究

一般商船の復原性及び安全性に関しては既に研究を実施してきたが、原子力船についてはその特殊性にかんがみ、次のような項目について特に留意する必要がある。

- (i) 損傷時の復原性の研究
- (ii) 甲板上への海水打込みの研究

前者は、不幸にして船体に損傷を生じ船内に一部浸水した場合の横方向、縦方向の静的及び動的の復原性等を船内区画及び浸水口の位置、大きさと関連させて調査することと、さらに沈没という最悪の状態に到つた場合、沈没姿勢速度等を同様に調査してコンテナの圧力平衡弁の形状を決定する資料を得ることの2つを含んでいる。

これらについて本格的実験を三鷹水槽で実施する計画である。甲板上への海水打込みは、現在でもしばしば甲板破損等の事故の原因となつた現象で、高速原子力船の場合には特に慎重に考慮する必要のある問題である。これについては迎え波及び横波の場合についてそれぞれ理論的、実験的研究が完了している<sup>(4)(5)</sup>。

斜め波中の問題やまた船体形状の変化に対する調査等の研究が今後に残されている。

(研究発表)

- (1) 〓船舶の波浪中における復原性に関する研究、日本造船研究協会報告第25号
- (2) 〓船舶の安全性向上に関する研究、日本造船研究協会第23部会報告
- (3) 〓海難防止に関する船舶の技術的研究、日本造船研究協会第43部会報告
- (4) 〓船の横揺による海水打込みと最適乾舷について、菅井和夫  
第20回運研研究発表会 昭和35年11月
- (5) 〓船舶の波浪中における甲板への海水打ち込みについて、田崎 亮  
運研報告第11巻第8号 昭和36年8月

### 〔D〕 コンテナ及び周辺構造に関する研究

原子力第1船においては、10,000 Ton の T-2 型タンカーが衝突した場合にコンテナ周辺の構造により衝撃力を吸収する方式をとり、それに必要な強度を有する周辺構造を採用したことになっている。

しかしながら、実際には 132,000 Ton の日章丸をはじめとする50,000 Ton 以上の超大型タンカーが、就航している現状からみると、もしこれらの超大型船が10,000 Ton の衝突船を対象として設計された原子力船に全速力で衝突すれば、突込んでくるおそれがある。

したがつてコンテナの静的および対衝撃強度については早急にするとともにその安全性を確認しておかなければならない。

上述のように周囲の情勢が急激に変化してきたのであらためてコンテナの強度について研究し、その設計基準を作成する資料としたい。

試験には静的荷重の場合は船体構造部の300 Ton 構造物試験機を使用するが衝撃荷重の場合は衝撃荷重試験機の新設が必要とされる。

## 5. 原子力船の波浪中運動性能の研究

原子力船の開発に当つては、波浪中の船体動揺その他により原子炉系に加わる加速度、衝撃力等が原子炉設計に直接必要な資料となるほか、船体運動の面からも、つぎに列挙するような多くの解明すべき問題が残されている。

- (i) 原子力船の波浪中動揺性能の研究
- (ii) 原子力船の波浪中抵抗増加に関する研究
- (iii) 原子力船の動揺防止に関する研究

- (iv) 原子力船の操縦，針路安定性の研究
- (v) 原子力船の流力弾性に関する研究
- (vi) 原子力船のプロペラに関する研究

船体運動に関しては，従来から試験水槽による模型試験が最も有効な研究方法として活用されてきたが，上記の諸問題については，いずれも複雑な過渡的現象をふくむため，有効な模型試験の実施が困難であった。船舶技術研究所では，はやくから推進性能部\*（目白）及び運動性能部\*\*（三鷹）の試験水槽設備を利用しているが，この種試験技術の開発<sup>(1)</sup>に努めてきたが，昭和34年度から，その成果をもととして，原子力船波浪中運動性能に関する本格的な研究を開始した。即ち目白水槽では主として迎い波の中における基本的な抵抗推進性能等の計測を，三鷹水槽では斜め波中の動揺操縦，旋回等も含んだ総合的な運動性能の計測を中心としてそれぞれの水槽の特質を生かした題目を分担して研究を実施中である。

以下その概要を略記する。

#### (1) 原子力船の波浪中動揺性能の研究

(研究経過)

本研究には

- (a) 波浪中の動揺特性の研究（減衰係数と見掛け質量の研究）
- (b) 縦揺れ，上下揺れにより原子炉に働く加速度の研究
- (c) スラミングの衝撃により原子炉に働く加速度の研究
- (d) 不規則波中の動揺特性の研究（原子力船のうける異状強制外力の研究）
- (e) 原子力船の動揺予知装置の研究

等の項目が含まれ，これらの研究のために次のような施設が設置された。

昭和34年度	不規則波形分析器
昭和35年度	ジャイロ式強制動揺機 模型船（2.5 m）2隻
昭和36年度	データー処理装置 船体運動記録装置 模型船（30 m）2隻
昭和37年度	自動ストローク加減装置 A-D変換器
昭和38年度	模型プロペラ駆動機 模型船（4.5 m）2隻

(研究成果)

規則波浪中の問題については，動揺応答解析に関する理論研究と併行して，4.5 mの自航模型船による実験的研究が，実施され，現在までに大型油槽船，高速貨物船，観測船型高速船型等に対する実験が行なわれている。これらの資料から，船体の縦揺れ，上下揺れによる船体傾斜や原子炉に働く加速度等の資料が得られた<sup>(2)</sup>。

更に38年度より斜め波中の実験が行われ，一部資料が得られている<sup>(21)</sup>。

模型船を強制的に動揺させて航走せしめる。いわゆる強制動揺試験も，船体運動方程式を解くに必要な減衰係数等を求めることができるから，この問題に対する有力な研究手段であるが，このために模型船内に搭載するジャイロ式の強制動揺機と，模型船曳引車上から外力を加える強制動揺試験機\*\*\*とを製作した。これによる実験も既に一部終了している<sup>(3)(22)</sup>。

このような規則波中の研究は，実際の船を考えた場合，当然不規則波中の問題へ拡張されねばならない。これについての理論的研究も略々完了に近い<sup>(4)(5)(6)</sup>。

波浪中の実験は，規則波中であつても，計測項目が平水中に比して数倍する上に，計測値の取扱いも位相関係の解析をも必要とするから，非常に手数を要する。ましてこれが不規則波の実験ではその手数が更に数倍するから，データ処理の機械化が絶対に必要で，この面からの施設整備も一部完了したので，今後この面で成果を上げてゆくことができる。

(問題点及び今後の計画)

この研究における最終目標は，与えられた船型に対して実際太平洋中で遭遇すると思われる波浪状況における動揺性能を，予知することであろう。このためにはさらに船型を系統的に変化させた多くの模型船についての実験を行なつて資料を整備することが必要であるとともに，不規則波中の実験実施をさらに容易ならしめるためにデータ処理の高速化，造波装置の改修，さらにまた実際の海洋波により近似の短波長波中の実験

---

* 第1水槽	長さ 200 m	巾 10 m	深さ 6 m
第2水槽	長さ 207 m	巾 8 m	深さ 4.5 m
キャピテーション水槽	測定断面 50cm × 50cm		
			流速 8 m/sec

\*\* 大型角水槽 80 m × 80 m 水深 4.5 m

\*\*\* 原子力潜水船の研究と共用

をも可能ならしめる造波機の増設等を計画している。

また、現在までに得られた成果から、船上で波浪及び動揺応答を連続記録し、それにより常に30秒乃至1分先までの動揺波形を予知することが可能であることが明らかとなった。これにより必要な場合には、原子炉のスクラム警報を発生しめるとき装置も可能となるから、原子力船保安のための有力な手段を提供し得るものと考ええる

## (2) 原子力船の波浪中抵抗増加に関する研究

### (研究経過)

原子力力によつて従来予想されなかつた大馬力が容易に利用し得る道がひらけたとしても、波浪のために船速を落とさねばならないような船型では、原子力の効果を充分発揮し得ない結果となる。このために波浪中の抵抗増加の本質を明らかにし、波浪中推進性能の優秀な船型を見出すことが、本研究の目的であるが、当面実施中のものは

#### (a) 規則波中抵抗増加の研究 (船型の影響)

#### (b) 抵抗増加の不規則波中への拡張

の2つの問題に要約できる。

本研究は、もちろん前項の動揺特性の研究と密接な関係にあるから、前項に掲げた実験施設も本研究に使用されるが、その外、昭和34年度には不規則波中の抵抗試験用のガイド装置及び抵抗動力計を完成した。

### (研究成果及び今後の計画)

文献<sup>(7)(8)</sup>に示す油槽船及び超高速船については各種の規則波中におけるスラスト増加、馬力増加等に対する資料が得られ、また統計理論<sup>(9)</sup>による大洋波中への拡張が行われている。さらに36年度からは強制動揺試験機による実験で波浪中における抵抗増加の本質に関する実験的解明を進めつつある<sup>(3)</sup>。

今後更に各種船型について、系統的な実験を進め船型要素の抵抗増加に及ぼす影響を明らかにするとともに、波浪中における最良船型を開発しようと考えている。

## (3) 原子力船の動揺防止法の研究

動揺防止は今まで主に旅客船の場合にのみ考慮されていたが、原子力船の場合にはその効果がさらに大きいと言うことができる。当研究所では、昭和36年度からこの研究に着手しており、ひれ式スタビライザーの模型を製作した。この研究の基礎としてこれまでに得

られた動揺特性に関する研究成果が充分いかされていることは言うまでもない。

動揺防止の手段として従来知られているものは、ジヤイロ式スタビライザー、前記のひれ式スタビライザーのほか、減揺水槽を利用する方法があり、また防止の対象は横揺れに主眼がおかれていた

当研究所ではまずひれ式スタビライザーについて、ひれにかかる流体力の基礎的測定を、37年度から実施し、一方この方法の縦揺れ防止への拡張を調査する。さらにこの方法は船が停止している場合には効力を失うので、この場合の対策として減揺水槽の研究を行い一応の成果を得ている<sup>(23)</sup>。

## (4) 原子力船の操縦、針路安定性の研究

操縦性、針路安定性は一般の船舶にも重要な研究項目で、運動性能部における基本業務の一つであるが、原子力船の場合には、衝突等の事故を絶対に防止する事が必要であるから、特に厳密に考究することを要する。三鷹の大型角水槽<sup>(9)</sup>はこの問題に対して最も有効な研究手段を提供するもので、昭和35年には無線操縦模型船による実験方法を確立し<sup>(10)</sup> 36年度までに方形係数、長さ一巾比を系統的に変化させた模型船についての実験を終了し、37年度以降はさらにこの系統を拡大し、又観測船型模型や球状船首型模型についての実験を実施した。一方針路安定性の研究、舵単独の性能の研究もこれと平行して実施中である<sup>(11)(12)(13)</sup>。

波浪のある海面での操縦性能は、問題がさらに複雑である。これについての予備実験は36年度完了し<sup>(14)</sup>、一時中断したが39年度に引続き実施の予定である。また、旋回中の主機の負荷変動、船体傾斜等の問題も、船が高速化、大型化する程重要となってくるから、その研究も行いつつある<sup>(24)(25)(26)</sup>。

## (5) 原子力船の流力弾性の研究

舵、プロペラ等を媒体として、流体力に基づいて、発生する船体の振動等の弾性現象を流力弾性 (Hydroelasticity) と呼び、これは船の高速化、大型化に伴つて最近注目をあつめている問題である。次項に述べるプロペラの負荷変動もこの範囲に含ませることもできる。この問題は、船体の流力的特性と弾性的特性の両者が複雑に結びつくため、その解明になかなか困難で、原子力船の場合には、その原子炉系に異質な振動外力を加える懸念が十分考えられる。これについては現在プロペラ後流中におかれた舵に基づく流力弾性現

象と、不均一な流場中におかれたプロペラの特性についての理論研究<sup>(15)(16)(17)(30)</sup>が進められており、前者については一部の予備実験も終了した。38年度に模型プロペラ駆動機を完成したから、39年度以降理論研究と併行しての実験的研究を実施する計画である。

#### (6) 原子力船のプロペラに関する研究

原子力船の推進方法に関する問題として現在次の二項目を取り上げている。

##### (a) プロペラの負荷変動の研究

##### (b) キャピテーション防止の研究

前者は波浪中による抵抗変化に基因する変動、波浪伴流の時間的な変化による変動、船尾伴流の不均一にもとづく変動、キャピテーション発生に起因する変化等に分けられるが、これらが総合されて、原子炉系の負荷変動として現われる。これについての理論的研究<sup>(18)</sup>に引き続いて、昭和35年度にプロペラ負荷変動測定装置と位相差解析器を、36年度には、船尾部流速測定装置を完成して、まず規則波中におけるプロペラの回転数、スラスト、トルク等の変動の計測に成功した<sup>(9)</sup>。今後さらに各種の船型、船尾形状について、変動の振幅、位相関係の調査を進める予定である。

キャピテーションの問題は原子力利用による高馬力化を可能ならしめる上から、特に重要である。即ちキャピテーション発生によるプロペラ翼の潰蝕、プロペラ効率の低下等を防止することは、高馬力を有効に活用する先決条件で、この研究には、推進性能部のキャピテーション試験水槽が最も有効に利用される。従来一般商船用プロペラのキャピテーション防止に関する研究が本水槽で実施され<sup>(19)</sup>また潰蝕と関連して、伴流中で作動するプロペラの非定常キャピテーションの研究が実施された。<sup>(20)</sup>

本年度は、観測船型高速船用プロペラについて、伴流中のキャピテーション実験の準備中で、今後高馬力用プロペラの研究が続行される予定である。

さらに、キャピテーションに関しては、スーパーキャピテーティングプロペラ、ベンテイレーティングプロペラ等の研究も当然必要で、その目的での施設の一部改良を計画中であり、またプロペラに代る推進方式としてのジェット推進等についても調査中である。

#### (7) 原子力第一船の運動性能及び安全対策の研究

以上が船舶技術における「原子力船の波浪中運動性能の研究」の経過ならびに将来計画の概要であるが、

原子力第一船の設計建造に当り、まづ第一段として船型決定のため各種の試験研究が、前項までに述べた如き要領で数隻の模型船について実施され、さらに船型が決定すれば、その最終船型について、性能確認のための試験研究が実施されるであろう。これによつて、わが国の原子力第一船が、船体性能の面からも最上級の船となることを期待できるであろう。

#### (研究発表)

- (1) 「波浪中における船型試験用の諸計器、  
西周次 運研資料 No. 30 (一般4)  
昭和35年12月
- (2) 「船体運動により船舶原子炉に働く外力についての一考察、  
川島栄一、坂尾稔、田崎亮  
造船協会論文集第105号 昭和34年7月
- (3) 「強制動揺試験法による船体動揺特性の研究  
(第一報)、  
田中拓、北川弘光 造船協会論文集第111号  
昭和37年6月
- (4) 「船の動揺の時系列論的解析について、  
山内保文 造船協会論文集第99号  
昭和31年7月
- (5) 「船の波浪中動揺応答の解析法について(その1)~(その3)、  
山内保文 造船協会論文集第109, 110, 111号  
昭和36年6月, 12月, 昭和37年6月
- (6) 「不規則現象のスペクトラム解析に及ぼす非線型応答要素の影響について、  
山内保文 第24回運研研究発表会  
昭和37年11月
- (7) 「On Self-propulsion Tests in Waves with Super Tanker Models、  
Ryo Tasaki and Hiromitsu Kitagawa,  
TTRI Report No. 44 June 1961
- (8) 「超高速船の波浪中水槽試験、  
田崎亮、北川弘光 第22回運研研究発表会  
昭和36年11月
- (9) 「三鷹船舶試験水槽(略号 MI S. E. B.)の構造機能について、  
志波久光 運研報告第11巻第12号  
昭和37年2月
- (10) 「一雙螺旋模型船の自航旋回試験結果について、志波久光、山内保文、花岡達郎、小 関信 篤

- 造船協会論文集第101号 昭和32年 8月 昭和38年11月
- (11) 〓模型船による最適舵面積の研究、  
志波久光, 水野時雄, 富田哲次郎, 江田治三  
造船協会論文集第105号 昭和34年 7月
- (12) 〓模型試験による舵の研究、  
志波久光 造船協会論文集第106号  
昭和35年 1月
- (13) 〓Model Experiment about Manoeuvrability  
and Turning of Ships,  
H. Shiba; DTMB Report No. 1461 Oct  
1960
- (14) 〓自航模型船による旋回性能の研究, 船幅の旋  
回性に及ぼす影響と波浪中における旋回性能、  
江田治三, 志波久光 運研報告第11巻第12号  
昭和37年 2月
- (15) 〓非定常プロペラ理論序説、  
花岡達郎 造船協会論文集第109号  
昭和36年 6月
- (16) 〓非定常プロペラ揚力線の積分方程式につい  
て、花岡達郎 造船協会論文集第110号  
昭和36年12月
- (17) 〓推進器と船体の干渉に現われる特異現象、  
花岡達郎, 高石敬史 第22回運研研究発表会  
昭和36年11月
- (18) 〓波浪中における自航試験と駆動機の特性、  
田崎亮 造船協会論文集第101号  
昭和32年 7月
- (19) 〓AU型五翼推進器の空洞試験、  
伊藤達郎, 高橋肇 第14回運研研究発表会  
昭和32年11月
- (20) 〓舶用プロペラの非定常キャビテーションに関  
する研究、  
伊藤達郎 造船協会論文集第111号  
昭和37年 6月
- (21) 〓斜め波中の船体運動と曲げおよび振りモーメ  
ント、  
郷田国夫, 小川陽弘, 島田尚信  
第1回船研研究発表会 昭和38年12月
- (22) 強制動揺法による船の横揺特性の研究  
菅井和夫, 山内保文 造船協会論文集第114号  
昭和38年12月
- (23) 〓減揺水槽について(第1報) - Flume 型横  
揺軽減水槽の実験的研究、  
山内保文, 安藤定雄 第1回船研研究発表会
- (24) 〓高速艇の旋回性能、  
菅井和夫, 森政彦 第24回運研研究発表会
- (25) 〓操舵による船の横傾斜、  
菅井和夫, 藤田起夫 第24回運研研究発表会
- (26) 〓高速艇の旋回性能について(一軸一舵の場  
合)、  
辻豊治, 森政彦 第1回船研研究発表会
- (27) 〓プロペラ後流中の舵が受ける起振力につい  
て、菅井和夫 造船協会論文集第115号

## 6. 原子力潜水商船に関する研究

(研究経過及び今後の計画)

潜水商船の構想は原子力機関の実現によつてはじめて可能となつたものであるが、潜水商船が水上船に対抗して経済的に成立しうるかは今後の検討にまたねばならない問題である。

このような経済性の比較を行なう場合、まずその推進性能が明かにされることが必要である。しかるにこのような没水船体の抵抗の推進に関する問題については、模型実験が非常に困難なことで、また目的が主として軍用に限られ資料がすべて秘扱いとされたことなどから、文献として発表されたものは殆んどない。

また商船として潜水することの利点を生かすためには、当然相当の高速を狙うことが必要であるから高速時の水中安定性能が確保し得るか否かが潜水商船の実現の一つの鍵となるが、このような高速時の安定性能の研究は全く行われていない。

当研究所における潜水商船の研究は、目白第二試験水槽を利用して、没水船体の抵抗試験及び3分力試験を主として昭和31年頃から開始されている。当初は主に水槽試験法の開発に力が注がれ、昭和34年春までに6米大型模型による抵抗試験、4米模型による3分力試験および強制動揺試験等の予備実験に成功し、この結果にもとづいて昭和34年度より本格的な研究に着手した。

昭和34年以後の研究は次の3種に大別することができる。

- (i) 潜水船の推進性能の研究
- (ii) 潜水船の水中安定性能の研究
- (iii) 潜水船の経済性の研究

### (1) 潜水船の推進性能の研究

昭和34年度には下記水槽試験用測定器の設計および製作をおこない、昭和35年度以降はこれらの装置の実用化に努めているが、後に述べる如く本研究は昭和36年度から潜水船の経済性の研究と関連してすすめられている。

本研究に関係して作られた施設は次の通りである。  
(全部、昭和34年度)

- (a) 潜水船用抵抗動力計
- (b) 潜水船用自航動力計
- (c) 潜水船用副部抵抗測定装置

これらの推進性能測定用の諸計器は、昭和34年以前の予備研究の結果に基づき、次の観点から計画されたものである。

すなわち潜水船の抵抗相似則の研究および実船研究の推定には、造波抵抗を含まないような十分に深い没水深度において高いレイノルズ数 ( $10^7$ 以上)における抵抗試験結果の検討が必要であり、また副部単独の抵抗値および主船体と副部の相互干渉に関するデータを求める必要がある。

従つて大型模型を高速で曳引するに適した船内自蔵型の抵抗動力計と模型抵抗の計測と、同時に副部単独の抵抗が測定できる副部抵抗測定装置を製作した。

また、潜水船の推進効率を知る必要から船内自蔵型の小型自航動力計を製作した。

潜水船の抵抗および自航試験は水上船のそれと較べて著しく困難であり、多数の人手を要するために未だ充分に実験技術上の諸問題を解決していない。

また、この種の実験は潜水船実用化に際し、多数の系統的模型船について実施する必要があるものと思われる。このために更に装置を改良して実験の能率化と簡易化を計ることが今後の最も重要な問題である。

### (2) 潜水船の水中安定性能の研究

水中縦安定性能に関する予備研究を昭和34年度に実施したが、これは前記の3分力動力計、強制動揺試験装置を用いて、長さが2m~4mの回転楕円体相似模型について、縦安定性能を検討したものである。

この結果潜水船の縦運動方程式を決定するに必要な13ヶの係数を測定し、または算出する方法を確立し、前記回転体模型を長さ160mの実船と見做した場合の潜水船の縦安定の限界を求めた<sup>(3)</sup>。

昭和35年度には上記の予備研究の結果と経験に基づ

き、本格的な縦安定性能の研究に必要な測定器の設計がすすめられ、5分力動力計および強制動揺試験装置を完成した<sup>(4)</sup>。

水中安定性能の研究には先づ潜水船の水中における運動方程式の正確な把握が必要である。このため昭和36年度より実験の容易な水上船を用いて予備実験を行った<sup>(4)(5)</sup>。

この実験の結果は上記の強制動揺試験装置の性能を確認しただけでなく、船体の縦運動方程式の研究に貢献することができた。

船体の縦運動と船体運動に基く波の相互干渉については主に理論的な研究だけがすすめられていたが、今回の実験から、いわゆる限界周波数 ( $\frac{v_w}{g} = \frac{1}{4}$ ) の前後で、見掛質量および減衰係数が極めて大きく、かつ不連続な値となる等その特異な性質を明らかにすることに成功して、実験的研究に新しい一面をつくることができた。

またこの実験の結果によると、船体の縦揺れおよび上下揺れの相互影響はかなり大きく、高次の非線型項の値は、動揺が小さい範囲では無視できる程度のものであることがわかった。

この実験は今後も潜水船、水上船、半潜水船等について研究をすすめ船舶の運動方程式の研究につくしたと考えている。

### (3) 潜水船の経済性の研究

どのような船種、船型、大きさ、速力、浮上吃水等をもつ潜水船が最も実現の可能性があるかについて研究することは、現在の段階では、最も重要な問題である。このために潜水船の経済性に関する研究と調査が昭和37年度よりはじめられた。

潜水船の船型は抵抗、推進の見地からは円形断面のものが最も有利と考えられるが、実用の潜水船では浮上時の吃水が深すぎるため、かなり扁平な矩形その他の断面の船型を用いなければならない。

また潜水船は油タンカの如く、比重が海水よりも軽い貨物を積載する場合には船殻重量は充分重く設計することが可能で、深い潜航深度に耐えるに必要な強度をもたせることができる。

一方海水よりはるかに比重が重い貨物を運ぶ潜水船は船殻重量を軽くつくる方が得策であるから、深い深度と同様浅い潜航深度における潜水船の推進性能を研究することも重要である。

このような意味から円形断面の潜水船模型1隻、矩

形断面のもの4隻について、各種の潜航深度における抵抗、揚力、縦揺れモーメントの三分力試験が実施された。

この結果同じ排水量で比較する場合、深い深度では円形断面のものが最も推進性能が優れているが、船体の平行部分の長い矩形断面の潜水船は抵抗のハンプホローが極端であるため、抵抗がホローとなる、フルード数0.25、または0.31前後の速度では、ほとんど造波抵抗が無視できる程度の値となることがわかり、潜水船船型の研究に重量な資料を与えることができた<sup>(6)</sup>。

昭和38年度9月より潜水船の経済性に関する研究は川崎重工業潜水艦部との共同研究として本格的に開始され、現在潜水タンカに関する経済性の検討の大半を終っている<sup>(7)</sup>。

この研究は上記模型試験の中から最も潜水タンカに適した船型を一種選んで試設計をおこない、載荷重量、船速、浮上吃水等を変数として、系統的に経済性を検討し、輸送コスト、各種の USMC 係数に対する資本回収率等を計算したものである。

この研究は今後潜水貨物船に対しても研究を続ける予定であるが、潜水タンカは原子力主機の価格が現在予想されるものより大幅に安く製作されない限り実用化されることは不可能で、また最適速力も現在の水上タンカとほぼ同じ程度といった結果が示されている。

潜水商船の基本設計に関連する要素は極めて多く、また相互に複雑な関係をもっているため、多数の要素を組合せた試設計算を多数おこなうことは到底不可能である。

したがって上記研究完成後の第二目標として、高性能な電子計算機による作業が必要で、これが将来の研究課題となつている。

なお潜水船の研究に関連して半潜水船に関する調査と若干の関連実験が昭和38年度に実施された。半潜水船は潜水船と同じく高速時における推進性能の改善をねらつたものであるが、空気中から酸素を供給するため、ディーゼル等在来型の主機を使用し、必ずしも原子力によらない利点をもっている。

しかしこの方面の研究は内外ともに潜水船より一段とおくれ、今後の基礎的な研究を積み重ねる必要がある。

#### (研究発表)

##### (1) 潜水船用水槽試験装置

伊藤達郎, 田中拓 第22回運研研究発表会

昭和36年11月

##### (2) 潜水船の抵抗試験について

土田陽, 田中拓 第1回原子力船シンポジウム 昭和33年10月

##### (3) 潜水船の縦安定性能

土田陽, 平野美木, 黒田七郎, 田中拓, 津垣昌一郎 造船協会論文集第107号 昭和35年

##### (4) 強制動揺試験法による船体動揺特性の研究(第1報) 田中拓, 北川弘光

造船協会論文集第111号 昭和37年

##### (5) Investigation of Longitudinal Ship Motions by Method of Farced Oscillation

田中拓, 北川弘光 第10回国際水槽会議資料

##### (6) 矩形断面潜水船

田中拓 第1回船研講演会 昭和38年11月

##### (7) 潜水船の経済性に関する研究(潜水タンカの場合) (未刊)

## 7. 高速、大型原子力船の開発に関する研究

船の速度、大きさが新しい技術の開発とともに増大してきていることは歴史的事実である。戦後の船舶の高速化、大型化の傾向は特に目ざましいものがある。

しかし原子力の利用は丁度それが原子力潜水商船という新しい構想をうみだしたように、タンカーや貨物船に対しても、さらに一段飛躍した高速化、大型化への変化を招来するであろうことは必至である。

このような情勢に対処して高速、大型原子力船の開発のための研究を開始せんとするものである。

### 〔A〕 船型に関する研究

船舶の高速化、大型化を図る場合、船型学的には先づ高速化や大型化にともなう水抵抗の増大を最小限にくいとめることを考慮せねばならない。

速度について例示すれば、高速化とともに造波抵抗の著しい増大を来たすのが水上を航走する船舶の避けることのできない宿命的な現象である。現在では大型タンカーの場合は16~17ノット、高速貨物船では、20~21ノット付近の速度が採用されている。

両者の場合、ともにこの速度を越すと急激造波抵抗が増大する。

しかし、大型タンカーの場合は24ノット付近で、高速貨物船の場合は27ノット付近で、再び抵抗増加が緩

慢となるいわゆる抵抗曲線の谷が表われる。高速化の目標として今後ねらうべきはこの速度範囲であろうと推定される。

さらに若干の数字を挙げれば、5万重量トン級のタンカーで24ノットなら、約15万馬力、長さ160m前後の高速貨物船で27ノットなら約5万馬力の出力を必要とする。

原子力の採用によりこの程度の馬力が比較的容易に利用し得るとしても、可能な限り馬力を減少せしめることが船型設計の必須要件であり、このために新しい船首バルブの採用等により造波抵抗の減少を図るとともに、他方では摩擦抵抗の減少策を講ずる等の新しい研究が開始されねばならない。

またこのような大馬力をプロペラに効率的に吸収させるための方策——キャビテーション防止、船体振動除去等を目的とした船型、推進方式の改善——が並行して考究されねばならない。

また大型化に対しては船体構造の面からと航行水路の面からとの制約をうけることが大きいから、かかる制約を考慮した上での最適船型の開発が必要となる。

船舶技術研究所においては大型船、高速貨物船の船型に関する研究を継続実施してきており<sup>(1)~(6)</sup>、またこれら船舶の超高速時の性能の研究も一部実施済みである<sup>(7)(8)</sup>。これらを基礎として現在よりさらに一段飛躍した高速、大型船の実現を目標として昭和40年度より新船型の研究を開始する予定である。

#### (研究発表)

- (1) 単螺旋大型油送船の肥瘠係数が推進性能に及ぼす影響に関する水槽試験  
土田陽，大橋誠三 船舶29巻，9号  
昭和31年1月
- (2) 単螺旋大型油送船の船中が推進性能に及ぼす影響に関する水槽試験  
横尾幸一，大橋誠三 船舶30巻，1号  
昭和32年1月
- (3) 超大型船の運航性能に関する研究  
日本造船研究協会報告第31号 昭和35年11月
- (4) 超高速優秀商船の船型に関する系統的模型試験(第1~4報)  
土田陽，横尾幸一，森山茂男，大橋誠三  
運研研究発表会 昭和36年11月，37年11月
- (5) 超大型船の系統的模型試験  
横尾幸一，矢崎敦生 外 船研研究発表会

(268)

昭和38年11月

- (6) 超高速船の運航性能に関する研究  
日本造船研究協会第45研究部会報告(近刊)
- (7) 大型油送船の高速時における平水中模型試験  
日本原子力船研究協会報告第11号  
昭和35年6月
- (8) 高速旅客船の平水中及び波浪中模型試験  
日本原子力船研究協会報告第36号  
昭和38年4月

#### [B] 船体構造に関する研究

将来の原子力船が従来の商船と、経済的に、太刀打ちできるためには高速化することが第1の条件であるということはよくいわれている。

たとえば、原子力船として適切と考えられるタンカーとして、ラストヌラ，下津間では8万トンで28ノット，10万トンで25ノット，14万トンで21ノットの場合に原子力船の方が有利であるという報告\*や、速力30ノットの高速貨物船群の建造計画が米国においてすすめられているという報告\*\*がある。

したがって、近い将来において、高速原子力商船が出現する場合にそなえて、高速化にともなつて生ずる船体構造上の問題点をとりあげて、研究をすすめ、合理的な構造の設計に資することは、きわめて重要である。

この見地からみると、つぎの問題点があげられる。

- (1) 船体の合理的構造に関する研究
  - (a) 繰返し異常外力による船体の疲労強度の研究
  - (b) 波浪衝撃による船体構造、強度の研究
- (2) 船体用材料に関する研究
  - (a) 船体用材料の耐衝撃性能の研究
  - (b) 特殊材料の適用性の研究

なお、原子力船においては脆性破壊のように瞬時に船体が2分するような重大事故が絶対ないようにしなければならず、万一脆性破壊が発生しても、その伝播拡大を阻止する必要がある。

このために従来の商船の場合より一層、安全度の高い、靱性の大きい鋼材を使用する必要がある。したが

\* 鈴木達太郎「原子力船の見透し」，運輸調査月報5-4，38年8月，pp 64-67

\*\* 「欧米における原子力船開発の現況(海外出張報告，1964年1月)」原子力船，1964年3月 pp 142-159



つて、高速で伝播してきた脆性破壊を停止させる機構と必要にして十分な材質、寸法のクラック・アレスタの研究をおこなわなければならない。すなわち、つぎの研究題目をあげることができる。

### (3) クラック・アレスタの研究

以上の研究により、原子力船の合理的な船体構造の設計をおこなうことができる。

なお、これらの研究に必要な設備として、二軸疲労試験機、衝撃荷重試験機、超高速衝撃引張、圧縮試験機等があげられる。

## 8. アイソトープ利用による研究及び放射性物質の輸送に関する研究

### [A] アイソトープ利用による研究

アイソトープを利用して、原子力船などの圧力容器の溶接部、大型構造物、大型鋳物などの放射線検査の研究と、運輸機関の摺動部の摩耗の研究について、昭和35年度より設備を整備し、昭和37年1月より試験研究を行なっている。

アイソトープ実験室 125 m<sup>2</sup> (昭和35年度)

施設	照射室	}	換気, 最高 15回/1時間 冷暖房 外気±5°C
	照射操作室		
	トレーサー 実験室		
	ドラフトチャ ンバー 2ヶ		
	測定室		
	汚染除去室		
	暗室		

機械室 (空気洗浄機, 空気調和機)

Co<sup>60</sup> (50c) 透過写真検査装置 (昭和36年度)

Ra-Be 中性子源 50mc ( " )

摩耗試験装置 1式 ( " )

荷重	100 kg
速度	3.5—23 m/s (4段)
温度	Max 700°C

ドライボックス (昭和37年度)

測定器 (昭和35年度以前整備)?

ガイガー, カウンター

シンチレーション・カウンター

### (1) ガスタービン等の耐熱材部材の接着改善による性能向上の研究

ガスタービン翼等の耐熱材料のろう接圧接等の接着部の強度は、ろう合金中の各種元素と母材との相

互拡散によつて生じた境界の性質に左右される。また、Ti, Zr 等の耐蝕性金属と Ni を主とする材料の接着では、母材相互の拡散は大きな要素である。この接着機構をアイソトープを使用して研究するため、先ずオートラジオグラフィ法による拡散の検討を行なつた。

比較的低温で簡易に実験できる Cu 及びその合金と Zn<sup>65</sup> との拡散状態、Ag 中における Ag<sup>110</sup> の自己拡散等の測定をオートラジオグラフィ法によつて試みた。

この結果、ろう接等の金属接着機構の研究にアイソトープをトレーサーとして、オートラジオグラフィ法によつて測定することにより相互拡散機構の基礎的現象を追跡できることがわかつた。濃度測定に使用するスリット巾と拡散深さの関係について調べた結果、拡散深さが少い程、スリット巾は狭いことが必要であつて、拡散深さ、15mm 程度では、スリットの径 0.4~0.5mm 以下であることが必要であつた。

(発表 Zr のろう付, 溶接協会, 特殊材料接合研究委員会?)

### (2) アイソトープを線源とする放射線透過写真検査の研究

#### (a) Co<sup>60</sup>-50c の $\gamma$ 線による透過写真検査

Co<sup>60</sup>-50c 位の装置であれば、15Mev ベータートロンなどのような大型ではなく、特殊な電源も必要でないで、ベータートロンよりは、はるかに移動性に富んでいる。よつて、原子炉等のベータートロンの移動不能場所における厚鋼板の溶接部の放射線検査には最適であると考えられる。その他、大型鋳物や自動車、電車などの厚物の構造物放射線検査にも利用度は大きい。

このような有用性を考えて、検査像の鮮鋭度、解像力、低下の原因である前方及び後方散乱線の低減方法、ならびに欠陥の識別能と濃度との関係を調べることにより、Co<sup>60</sup>-50c の  $\gamma$  線の使用し得る適当な鋼板の厚さの範囲を決定し透過写真検査方法を確立した。

発表 昭和38年秋 船研講演会

#### (b) Ra-Be (50mc) の中性子線による透過写真検査

X線等の放射線によつては検出できない成分上の欠陥の検出に中性子透過試験を利用することは有効と考えられる。

この研究を進めるため Ra (50mc)-Be の線源による透過検査の研究に着手して来た。その結果中性子数が少ないため、間接法で In 板の上において Cd の影を X 線フィルムに撮影することは困難であつた。今後 BF<sub>3</sub> カウターによる透過中性子線の検出を併せて行なう予定である。

(c) 運輸機関等の回転部、摺動部および摩擦部の摩耗の迅速測定の研究

本項の研究においては放射性物質の性質の利点を生かし、ラジオアクティブ・トレーサー法(以下単にトレーサー法とする)によつて標記の摩耗測定の研究を行なつている。

摩耗は二つの物体の接触によつて表面の減る現象であつて、機械などの性能保持などに関連のある重要な問題である。

それにもかかわらず、未解決な問題が多く残つている。これは、摩耗現象が温度、荷重などの機械的、化学的、物理的な諸要素によつて影響されやすく、いろいろの摩耗形態をとり、また、過去の履歴やふんい気などによつても強く左右されやすい複雑な現象であるためと言える。

また、このようにその機構の実体が掴み難いのに加えて従来の摩耗試験が多く資材と時間とを要することも一つの大きな理由であつた。

これに対し、トレーサー法を利用すれば、これまでの巨視的な実験ではとかく推測の域を出なかつたのに対し、その初期状態について明確な研究ができ、さらに摩擦面の接触機構や摩耗の微細構造までもあきらかにすることができる。

このトレーサー法は下記のような特徴を持つている。

- (i) 検出感度の高いこと。
- (ii) 得られた結果が他の方法よりも正確で、定量的であること。
- (iii) 比較的短時間で簡単に行なえること。

次に、トレーサー法を用いた実験方法としては摩擦する一方の材料にあらかじめなんらかの方法

で放射能を与え、摩擦前後の放射能の変化を測定するのである。

計測方法は、放射性物質から放出される放射線をガイガーカウンター、シンチレーションカウンターなどの放射線測定器を用いたり、X 線フィルムを感光させて放射性物質の自己写真を撮るオートラジオグラフィ法などによつて、摩耗量や摩耗状態などを測定する。

本研究は、銅を含有した試験片を原子炉に入れ中性子照射により放射能を与え、これを用いて接触機構を研究しており、現段階においては「摩擦時における、相手材表面への付着移行(Transfer)を表面アラサ、温度、速度、荷重の影響などについて検討している。

なお、この研究の一部は曙ブレーキ工業 K K との共同研究として実施中であり、高摩擦試験機と試験片試作製造装置は同社の所有のものである。

〔B〕 放射性物質の輸送の安全対策に関する研究

放射性物質の利用の増加に伴い、その輸送量は次第に増加しており、一方運輸機関の事故件数も交通の輻輳と共に増加の傾向にある。

当所としては、放射性物質の輸送中に事故が発生した場合の危険性にかんがみ、事故防止の万全を期すため、39年度まず陸上輸送の場合について調査研究に着手した。本研究においては、現在の輸送経路における積みおろしの取扱い状況、貨車自動車等の積載状況、積載時の漏洩放射線量、運搬人の被曝線量等の実態調査を行うと共に振動、圧縮、衝撃等取扱い事故又は車両の振動、急停、衝突事故等によつて誘発される容器及び外装に対する外力影響に対応する容器及び外装の強度試験を行つて陸上輸送の安全対策樹立に資す計画である。

40年度以降においては、船舶輸送に関して同様趣旨の調査研究を行い放射性物質の輸送容器及び外装並びに積載方法、輸送取扱い方法の研究を行い、輸送の合理化、安全性の向上を図る計画である。