

# 船舶技術研究所における原子力船開発研究の概要

(昭和39年度～昭和42年度)

## Research Work on Nuclear Ships

In this paper, the outline of research and development of nuclear ships, which have been carried out at the Ship Research Institute from April 1964 to March 1968, is described.

Investigations of nuclear ships were started in 1956 at the Transportation Technical Research Institute, the predecessor of the present Ship Research Institute. Since then, this research has been an important subject to the Institute. The Nuclear Ship Division and the Tokai Branch are mainly concerned with the research at present. As to the research work carried out from April 1956 to March 1964, it is requested to refer to the Report of Ship Research Institute, Vol. 1 No. 3・4, July 1964.

At the end of this paper, some considerations on radioactive isotope utilization are added.

### 目 次

- |                            |                            |
|----------------------------|----------------------------|
| 1. 原子力船の安全対策に関する研究         | (B) 原子力船の衝突回避に関する操縦性の研究    |
| (A) 原子力船の遮蔽の研究             | 5. 原子力潜水商船開発に関する調査研究       |
| (B) 原子力船の制御の研究             | 6. 軽水船用炉の熱流力学的研究           |
| (C) 原子炉圧力容器の安全対策の研究        | (A) 第1船炉心構造模型, 燃料要素模型実験    |
| 2. 原子力船の事故対策に関する研究         | (B) 軽水船用炉用内装貫流式蒸気発生器に関する研究 |
| (A) サイトの安全評価の研究            | 研究                         |
| (B) 原子力船の原子炉区画構成の研究        | (C) 軽水冷却原子炉循環方式に関する研究      |
| (C) 原子力船の損傷時復元性の研究         | 7. 放射線利用に関する研究             |
| 3. 船用原子炉の振動動揺対策に関する研究      | (A) アイソトープによる非破壊検査法の研究     |
| 4. 原子力船の振動動揺対策に関する研究       | (B) アイソトープを利用する摩耗の研究       |
| (A) 原子力船の不規則波中における異状加速度の研究 | 8. 放射性物質の陸上輸送の安全対策に関する研究   |
| 研究                         |                            |

### は し が き

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たが、すでにその頃から原子力船開発研究の必要性が提唱されていた。

当所の前身である運輸技術研究所においては、昭和31年に原子力船研究室を設け、調査研究を開始し、徐々に研究を拡大発展させたが、昭和38年4月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課題として取り上げ、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)を設置し、原子力船の開発研究を一層強化して現在に至っている。

ここに収録した概要は昭和39年7月に発行した船舶技術研究所報告第1巻第3・4号に掲載した続編としてとりまとめたもので、昭和38年度以前の研究内容については上記を参照されたい。

## 1. 原子力船の安全対策に関する研究

### (A) 原子力船の遮蔽の研究

中田正也 片岡 巖  
布施卓嘉

高度の安全性を保ちながら、しかも原子力船の機能や経済性を害さない放射線遮蔽を研究して、炉運転時、各種作業時および事故時における乗員、乗客、作業員および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。一般陸上炉と比較して、船用炉の遮蔽は軽量、小型化に特に留意する必要がある、実験的裏付けのある、格段に精密複雑な理論的研究に基づいた設計法が必要である。

昭和31年度から文献調査の段階ではじまった当所での遮蔽研究は昭和 32～33 年度より理論ならびに実験による具体的な研究に進んだ。これらの研究調査の結果、昭和36年度には電子計算システムの設置を見、また昭和 33 年度より昭和 35 年にわたり当所より予算要求した遮蔽研究用スイミングプール型原子炉は日本原子力研究所の昭和35年予算要求に移され JRR-4 として実現した。これらの装置および他の実船実験によって得られた成果は、原子力第 1 船の設計に当って具体的に利用され実効を示した。

当所で開発した運転時および事故時の原子力船内外での直接被曝計算コード MARINE の計算結果や実船における RI による線量率分布の測定の結果を検討したところ、船体のような構造物の遮蔽効果については、なお実験的研究が必要なおことがわかったので昭和 42 年度に予備の実験を行ない、以降昭和 43 年度より原子力予算によってガンマ線実験室を設置し、本実験の一部に着手した。また遮蔽体材料の一部について同じく 43 年度より研究を行ないたい。なお、昭和 44 年度より、中性子線についても実験できるよう希望している。

以下、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

##### (研究経過)

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 RI によるガンマ線の散乱の実験が昭和 33 年度からはじまり、昭和 39 年度にわたって行なわれ

た。

原子炉を用いた実験は昭和 34 年度に、JRR-1 に実験タンクを設置して行なった。これより前、昭和 32 年度から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, 34, 35, 36 年度の当所要求予算として取り上げ、昭和 35 年に日本原子力研究所において JRR-4 として設置される旨合意を見たので、昭和 36 年度より JRR-4 建設室に常駐研究員を派遣して計画、建設に協力した。完成後は同炉の特性試験を協同研究にて行ない、昭和 40～43 年度には当所予算による不規則形状物による遮蔽効果の研究および最適遮蔽の実験的研究を行なった。またこの間、日本原子力船開発事業団、日本原子力研究所と当所との協同研究による第 1 船遮蔽体の効果確認実験に参加した。

原子力第 1 船に近い構造の船として、航海訓練所練習船進徳丸に、コバルト 60 線源を持ち込み、各部の線量率分布および一部の点のガンマ線エネルギースペクトルを測定した。これは

- 1) 船体構造、積荷、タンクその他船内物品による放射線減衰効果の実測。
- 2) 原子力船の船体内外での任意点における放射線量分布を算出するコードとの比較検討の資料を得る。
- 3) 実船内における放射線測定技術の開発を目指し、計画中の一連の実船実験の準備段階である。

また、コンクリート遮蔽体からの散乱ガンマ線を減少せしめる目的で、遮蔽体表面を鉛鉄層で被覆する方法の効果について実験的研究を行なった。また原研と共同研究を行なっている原子力船遮蔽体の JRR-4 原子炉を用いる実験ならびに原子力船開発事業団および原研との三者共同実験による原子力第 1 船遮蔽体モックアップ試験を行なった。

船用炉の遮蔽体によく用いられる、水、鉄、コンクリートの単一層または多重層に  $^{60}\text{Co}$  または  $^{24}\text{Na}$  のガンマ線を入射させて、透過線量率および垂直方向のエネルギースペクトルを測定した。この結果は理論解析と比較した。

##### (研究成果)

- a) 船内各部の線量率分布の測定に成功した。この結果は MARINE シリーズコードの改良および入力データの取り扱いに重要な資料を与えるほか広く船体構造に対する遮蔽の研究に利用することができる。

- b) 今後に予定されている実船での本実験, さらに将来行なわれるであろう原子力第1船での線量率分布実測に対する方法と測定器に関する知識・経験が得られた。
- c) コンクリート遮蔽体の散乱ガンマ線は, 表面に1~2m/mの鉛層を貼付することで, 著しく減少せしめることが可能なことはすでに立証したが, この方法による時は鉛の特性X線が新たに加わり, X線装置も使用する作業室などでは散乱線に比して鉛特性X線の増加も無視できないが, さらにその上を鉄板0.4mm位で覆えば散乱ガンマ線も増すことなく, 鉛特性X線を防止できることが判明した。
- d) JRR-4の散乱実験室 No. 1プールの熱中性子分布, 速中性子スペクトルを明らかにし, 同炉使用実験に使う基礎資料を得た。
- e) JRR-4 No. 1プールを利用して, 鉄水多重層遮蔽体の組み合わせと遮蔽効果の関係を求める実験を行ない, 現在遮蔽設計コードとして使われているMAC-RADコードによる計算値と比較し, その計算コードの精度が求められた。
- f) 上記d, eの実験に使用する目的で, 中性子のスペクトルを測定するための放射化法の技術を確立した。
- g) 鉄層が3層, 水層が4層である場合, 水層の厚さを変えることによる遮蔽効果の変化を求める実験をし, 最適遮蔽を求める資料を得た。
- h) 中性子遮蔽を研究する際, 必要な高感度で分解能のよい中性子スペクトル測定器の開発を行ない, 限られた条件のもとでは使用可能であることがわかった。この測定器は今後の実験に使用される予定である。
- i)  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{24}\text{Na}$ をガンマ線源とした場合, 水, 鉄, コンクリートの各種厚さの単一層または多重層を透過したガンマ線の線量, エネルギスペクトルなどが測定された。この結果は, 当所で開発したガンマ線の解析法による計算結果と極めてよく一致した。
- j) 原子力第1船の遮蔽体モックアップ試験に参加して一次遮蔽体の放射線に対する遮蔽効果を測定し, 次のような結果を得た。
- 1) 炉心半径方向多重層の放射線透過実験から設計に用いられた計算法が安全側を与えていることがわかった。
  - 2) 計測管孔部については計算で確信のもてなかった値が実測により明らかにされ, 予想を下回った熱中性子束を高めるよう計測管孔を炉心に近づけるように設計変更を行なった。
  - 3) 炉心斜上方向については不規則形状構造, ボイドのない部分はある程度計算で評価できることがわかり, 不規則形状, ボイドの部分については実験データにもとづき設計変更を行なった。

## (2) 解析的研究

### (研究経過)

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ってきた。この目的には膨大な量の複雑な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年度の文献調査からはじまり, 32年度には原子力調査会においてBWRの遮蔽試設計を担当した。昭和33, 34年度は大型計算機IBM704を使用する遮蔽計算コードを, また35年度には中型計算機用の計算コードの研究開発を行なった。これらの経過を経て, 昭和36年度には, 中型計算システムNEAC2203G(2206)の基礎装置が設置された。これによって, 運転中および事故時の原子力船舶内外での直接被曝量を算出する計算コードMARINE-1を開発した。これは原子力第1船の2次遮蔽体の予備設計に使われた。その後, 実船実験との比較, 当所で行なわれている中性子およびガンマ線の透過に関する理論的研究の成果をとり入れてさらに優れたコードMARINE-2が作られた。

原子力船開発事業団の要請により, 原子力第1船の2次遮蔽体の予備設計ならびに船内での等線量率分布曲線の作成の作業に協力した。計算コードは当所の開発したMARINE-1を, 計算機は当所設置のNEAC2206を使用した。またMARINE-1をコードを使用する場合の入力の取り方および実用上の参考とするため, 実船を用いて放射線量分布の実測を行なった(前項進徳丸による実験)。

電子計算機システムの装備増設が完了したため, 従来当所で開発してその適用性が明らかになっている計算コードを改善, 拡張して実際の設計に使用できるよう整備を行なった。一部は進行中ないし完了した。たとえば, 運転中および事故時の原子力船舶内外での直接被曝線量の計算および2次遮蔽体の設計に使用する計

算コード MARINE-2 はほぼ完成した。

放射線輸送方程式を数値的に積分して放射線の平板中での詳細な分布を解析する一連の方法を開発した。まず、ガンマ線について開発した EOS を中性子の問題に適用するための研究ならびに SELENE をガンマ線の一方向、単一エネルギー線源に、または単一エネルギー等方線源に適用するための研究を行なった。さらに中性子については MENE 法を開発した。これらの解析法をさらに拡張して 2 次元問題用の Sn コードを作製し、一部の試計算を行なった。また中性子関係の遮蔽常数を収集整備した。シンチレーション検出器のガンマ線に対する検出応答の計算を、モンテカルロ法によって行なった。これによって検出値の補正が高エネルギーまで可能となった。

(研究成果)

MARINE-1 コードによる計算結果と進徳丸による測定結果と比較して次のような中間的な結論が得られた。

- a) MARINE-1 による計算結果は、通常の鋼板構造のみを入力とした場合は、常に安全側の解を与える。
- b) 船体重量から推定して主要構造物以外の物体を空間に平均分散しているものと考えたと計算値と実測値はよく一致する。
- c) 線源と測定点の間の鋼板の枚数が増加しても一致の程度は悪くならない。

当所で新たに開発した一連の解析法 EOS 法は中性子透過問題に適用して十分な結果を得られることが判った。SELENE 法は 1 方向単一エネルギーのガンマ線透過問題に、また MENE 法は中性子透過問題に極わめてよく適用できることが判った。また前述の実験結果と比較したところ、単一エネルギー等方ガンマ線が鉄、水、コンクリートの単一層または二重層を透過した場合の線量の推定に SELENE 法が極わめてよい結果を与えることが判った。

解析的研究の主要設備である電子計算機は、昭和40年度予算によって磁気テープ制御装置の設置を終わり、昭和41年度予算では磁気テープ装置 5 台、入出力制御装置 1 台、高速印字装置 1 台が設置された。これによって既に開発したプログラムの拡張、改善が行なわれ、また新たな解析法とプログラムの開発が進められた。すなわち昭和42年度から昭和43年度にわたってはすでに有用性の確認された上記の MENE, SELENE などの解析法を 2 次元問題に拡張し、一部の試計算を

行なった。またこれらの計算に使用するための遮蔽用常数を印刷物および磁気テープとして入手し整備を行なった。

### (3) 遮蔽材料

昭和34年度、日本原子力船研究協会と協力してサバノ号の 2 次遮蔽体と類似の構造物によって、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および加熱試験を行なった。遮蔽材料のうち船用に特に適したものについて調査を行なってきたが、昭和44年度より一部の実験をはじめたい。

(今後の計画と問題点)

- a) 実際の船用炉遮蔽の複雑な形状に適用できる開発が必要である。1 次元形状については研究がほぼまとまり、現在 2 次元問題に拡張したところである。これについての解析法およびプログラムとしてのチェックおよび実験値との対比等を今後行なう。
- b) 船用炉遮蔽設計に使用する核断面積など、常数の整備、外国の資料の入手は行なったが不足なものの補充、評価などを行なう。
- c) 現有の計算システムは遮蔽設計、解析法の開発に極わめて有効であったし、今後も重要であり、現在までに多くの成果を上げてきた。しかしながら、開発の完了した設計、解析法をより大型の、国内的にも国際的にもより普遍性のある計算機用プログラムに変換し、一般設計者がより使いやすくし、実際の極わめて厚い遮蔽体や広いエネルギー範囲にまで適用可能ならしめる必要があろう。
- d) 実船で純粹簡単化し得ない船体構造を含む船用炉遮蔽の模型（配置組合わせ変更可能）について、ガンマ線による実験が昭和43年よりはじめられるが、引続いて中性子による実験が必要である。
- e) 鉄水多重層における中性子束の実験は終了し、今後はスペクトル測定を行なう。これに関連し、現在 10 MeV から 1 MeV まで測定可能なスペクトルを 10 MeV から熱中性子まで測定可能にする。
- f) 鉛、水多重層と鉄、鉛、水多重層の研究を続行する。
- g) 不規則形状物の遮蔽効果に関する実験データは不規則の種類が多いこと、相似性の適用ができないことなどのため著しく不足している。この種の実験を数多く行ない設計資料とする。
- h) 単色点状中性子源による実験をすることが望まし

- い。
- i) 船用原子炉の遮蔽材料の研究, 特に実験的な研究が必要である。  
(研究発表)
- An Expression for the Neutron Blackness of Fuel Rod after Long Irradiation, H. Yamakoshi 船研欧文報告 No. 4 昭和39年8月
- Use of Response Matrix Method for Multilayer Shield Design, I. Kataoka, Trans. Int. Conf. of P.U.A.E., United Nations, Vol. 4, p. 657 昭和39年9月
- A Method for the Numerical Integration of the Photon Transport Equation in Slab Geometry, I. Kataoka, K. Takeuchi, Journal of Nucl. Sci. and Technol., Vol. 2 No. 1 昭和40年1月
- A Code and Some Results of a Numerical Integration Method of the Photon Transport Equation in Slab Geometry, I. Kataoka, K. Takeuchi, 船研欧文報告 No. 6 昭和40年3月
- 06 NIOBE-G コード使用説明, 竹内清, 船研報告 Vol. 2, No. 3 昭和40年5月
- Problems in Nuclear Reactor Shield Design, I. Kataoka, United Kingdom A.E.A. Report Risley-tr-351 昭和40年6月
- On the Fast Fission Factor for a Lattice System, H. Yamakoshi, 船研欧文報告 No. 7, 昭和40年6月
- 熱中性子散乱研究の現状と問題点, 山越寿夫他, 日本原子力研究所報告 JAERI 1086 昭和40年10月
- 球対称形状におけるガンマ線輸送方程式の直接積分コード'06 NIOBE-G'について, 片岡 巖, 竹内 清, 船研報告 Vol. 2, No. 6 昭和40年11月
- $\gamma$ 線の多重層透過問題—総説, 片岡 巖, 日本原子力学会誌 Vol. 7, No. 11 昭和40年11月
- コンプトン散乱角を乱数決定する一方法, 山越寿夫中田正也, 船研報告 Vol. 2, No. 6 昭和40年11月
- Gamma-Ray Transmission through Multiple Layers, I. Kataoka, United States AEC Report ORNL-tr-1620 昭和41年3月
- EOS-2 コード使用法, 竹内 清, 船研報告 Vol. 3, No. 2 昭和41年3月
- A Method for the Numerical Integration of the Neutron Transport Equation in Slab Geometry, K. Takeuchi, I. Kataoka, Journal of Nucl. Sci. and Technol., Vol. 3, No. 5 昭和41年5月
- $\gamma$ 線平板多重層遮蔽の解析法の研究, 片岡 巖, 船研報告 Vol. 3, No. 4 昭和41年7月
- A Study of the Method for Analyzing Multilayer Gamma-Ray Shields, I. Kataoka, United States AEC Report ORNL-tr-1671 昭和42年5月
- SELENE コード使用法, 竹内 清, 船研報告 Vol. 4, No. 3 昭和42年5月
- 原子力第1船遮蔽効果確認実験報告書, 第2篇, 1次遮蔽実験, 布施卓嘉, 野中健美, 三浦俊正他, 日本原子力船開発事業団報告 JNS-4-2 昭和42年6月
- Discrete Ordinates-Numerical Integration Method for Bulk Shielding Calculations, I. Kataoka, K. Takeuchi, Proc. Int. Conf. P.P.R.S., British Nucl. Energ. Soc., 1. 1. 昭和42年9月
- Comparison of Calculated Values with Gamma Dose Measurement in Ship Structure, M. Nakata, I. Kataoka, K. Kanai, Proc. Int. Conf. P.P.R.S., British Nucl. Energ. Soc., 2. 2. 昭和42年9月
- Shielding Studies for the First Nuclear Ship of Japan, E. Nishibori, T. Fuse, I. Kataoka, T. Miura et al., Proc. Int. Conf. P.P.R.S., British Nucl. Energ. Soc., 3. 2. 昭和42年9月
- 原子炉遮蔽技術の進歩, 古田 悠, 片岡 巖, 兵藤知典, 田中義久, 日本原子力学会誌 Vol. 9, No. 11 昭和42年11月
- Discrete Ordinates-Numerical Integration Method for Bulk Shielding Calculation, 片岡 巖, 竹内 清, 船研報告 Vol. 4, No. 7 昭和42年12月
- Mockup Experiment for the Irregular Shield of the First Nuclear Ship of Japan, T. Fuse, T. Miura et al., Nuclear Engineering and Design Vol. No. 2 昭和43年2月
- 原子力第1船遮蔽効果確認実験報告書, 第1篇, 総括, 中田正也, 片岡 巖, 布施卓嘉, 野中健美, 三浦俊正他, 日本原子力船開発事業団報告, JNS-4-1 昭和43年2月
- 中性子透過問題, 八巻秀雄, 布施卓嘉, 豊田行雄, 日本原子力学会誌, Vol. 10, No. 5 昭和43年5月
- Discrete Ordinates-Numerical Integration Method for the Neutron Transport Equation in Slab Geometry, K. Takeuchi, I. Kataoka Journal of Nucl. Sci. and Technol. Vol. 5 No. 7 昭和43年7月
- 不均質炉の高速効果について, 山越寿夫, 第2回船研研究発表会 昭和39年5月

長期燃焼後の熱中性子利用率, 山越寿夫, 第2回船  
研究発表会 昭和39年5月

原子力第1船の2次遮蔽および線量率分布の計算,  
片岡 巖, 菅 和子, 金森善彦, 第3回船研究発表  
会 昭和39年11月

板形状遮蔽体内における光子の輸送方程式の数値  
積分による解について, 片岡 巖, 竹内 清, 第3回  
船研究発表会 昭和39年11月

低速中性子の散乱実験結果と固体原子炉材料(BCグ  
ラファイト)の非弾性散乱断面積について, 山越寿夫  
第3回船研究発表会 昭和39年11月

燃料棒のアルベドについて(その2), 山越寿夫, 第  
4回船研究発表会 昭和40年6月

船体構造のガンマ線遮蔽効果(進徳丸), 中田正也,  
片岡 巖, 野中健美, 金井康二他, 第4回船研究発表  
会 昭和40年6月

Boltzmann 輸送方程式の数値積分法による中性子  
平板問題の解析, 片岡 巖, 竹内 清, 第4回船研究  
発表会 昭和40年6月

運転時および事故時の原子力船の直接線線量率分布  
計算コード MARINE-2 について, 金井康二, 片岡  
巖, 第6回船研究発表会 昭和41年5月

遮蔽設計に使用する $\gamma$ 線諸常数の検討, 伊藤泰義,  
山路昭雄, 第6回船研究発表会 昭和41年5月

平板形状における $\gamma$ 線輸送方程式の直接積分法  
SELENE について(その1・理論), 片岡 巖, 竹内  
清, 第6回船研究発表会 昭和41年5月

平板形状における $\gamma$ 線輸送方程式の直接積分法  
SELENE について(その2・応用), 竹内 清, 片岡  
巖, 第6回船研究発表会 昭和41年5月

輸送理論による板状多領域系の取り扱い, 吉村富雄  
第6回船研究発表会 昭和41年5月

鉄鉛薄層の散乱ガンマ線遮蔽効果, 中田正也, 植木  
紘太郎, 第6回船研究発表会 昭和41年5月

JRR-4 No. 1 プール特性試験, 布施卓嘉, 野中健  
美, 三浦俊正他, 第6回船研究発表会  
昭和41年5月

ガンマ線の平板斜入射問題について, 竹内 清,  
片岡 巖, 第7回船研究発表会 昭和41年11月

ガンマ線の多重散乱について, 山越寿夫, 第7回船  
研究発表会 昭和41年11月

NaI シンチレータ応答関数を求めるモンテカルロ計  
算コード, 中田正也, 第7回船研究発表会  
昭和41年11月

ガンマ線の平板角度分布線源問題 (SELENE コー  
ドによる), 竹内 清, 片岡 巖, 第9回船研究発表  
会 昭和42年11月

中性子平板問題の解析 (MENE コードによる),  
竹内 清, 片岡 巖, 第9回船研究発表会  
昭和42年11月

中性子に関する平板系多群輸送方程式の基本解,  
吉村富雄他, 第9回船研究発表会 昭和42年11月

コバルト60線源による平板物質透過ガンマ線のエネ  
ルギスペクトル (測定および計算との比較), 片岡巖,  
竹内 清, 伊藤泰義他, 第9回船研究発表会  
昭和42年11月

NaI シンチレーション検出器の使用条件による応答  
の変化, 中田正也, 第9回船研究発表会  
昭和42年11月

NE 213 有機シンチレーターのレスポンス, 布施卓  
嘉, 吉村富雄, 三浦俊正, 山路昭雄, 第9回船研究  
発表会 昭和42年11月

鉄水多重層における中性子の減衰とスペクトルの変  
化, 布施卓嘉, 山路昭雄, 三浦俊正, 第9回船研究  
発表会 昭和42年11月

Boltzmann 輸送方程式の数値積分法による $\gamma$ 線平  
板問題の解析, 片岡 巖, 竹内 清, 昭和39年日本原  
子力学会年会 昭和39年4月

散乱を含む燃料棒の high hum up 後の熱中性子利  
用率, 山越寿夫, 昭和39年日本原子力学会年会  
昭和39年4月

グラファイトに対する遅い中性子の散乱法則, 山越  
寿夫, 日本原子力学会第2回炉工学分科会  
昭和39年11月

板状多領域炉の臨界性に対する厳密解, 吉村富雄他,  
日本原子力学会第2回炉工学分科会 昭和39年11月

Be および BeO に対する遅い中性子の散乱法則,  
山越寿夫他, 日本原子力学会第2回炉工学分科会  
昭和39年11月

Boltzmann 輸送方程式の数値積分法による中性子  
平板問題の解析, 片岡 巖, 竹内 清, 昭和40年日本  
原子力学会年会 昭和40年4月

船体構造のガンマ線遮蔽効果(進徳丸), 中田正也,  
片岡 巖, 野中健美, 金井康二他, 昭和40年日本原  
子力学会年会 昭和40年4月

Boltzmann 輸送方程式の数値積分法による $\gamma$ 線平  
板問題の解析(II)片岡 巖, 竹内 清, 日本原子力  
学会第3回炉工学分科会 昭和40年10月

輸送理論による板状多領域系の取扱い, 吉村富雄他, 日本原子力学会第3回炉工学分科会 昭和40年10月

Boltzmann 輸送方程式の数値積分法による $\gamma$ 線平板問題の解析(Ⅲ) 片岡 巖, 竹内 清, 昭和41年日本原子力学会年会 昭和41年3月

鉄鉛薄層の散乱ガンマ線遮蔽効果, 中田正也, 植木紘太郎, 昭和41年日本原子力学会年会, 昭和41年3月

JRR-4 散乱実験室の中性子スペクトル, 布施卓嘉, 野中健美, 三浦俊正, 昭和41年日本原子力学会年会 昭和41年3月

JRR-4 散乱実験室の熱中性子特性, 布施卓嘉, 三浦俊正他, 昭和41年日本原子力学会年会, 昭和41年3月

鉄水多重層における中性子の減衰とスペクトルの変化, 布施卓嘉, 三浦俊正, 日本原子力学会第4回炉工学分科会 昭和41年10月

平板斜入射 $\gamma$ 線透過問題 (SELENE 法による計算) 竹内 清, 片岡 巖, 日本原子力学会第4回炉工学分科会 昭和41年10月

NaI シンチレーター応答関数 (8 MeV), 中田正也, 日本原子力学会第4回炉工学分科会 昭和41年10月  
 $\gamma$ 線の斜方入射と多重散乱, 山越寿夫, 日本原子力学会第4回炉工学分科会 昭和41年10月

原子力船1次遮蔽モックアップ実験(Ⅰ), 多重層透過, 布施卓嘉, 野中健美, 三浦俊正他, 昭和42年日本原子力学会年会 昭和42年4月

原子力船1次遮蔽モックアップ実験(Ⅱ), 計測孔内の熱中性子束分布, 布施卓嘉, 野中健美, 三浦俊正他 昭和42年日本原子力学会年会 昭和42年4月

原子力船1次遮蔽モックアップ実験(Ⅲ), 斜上方向における $\gamma$ 線線量率および中性子束分布, 布施卓嘉, 野中健美, 三浦俊正他, 昭和42年日本原子力学会年会 昭和42年4月

板状遮蔽体における中性子輸送方程式の数値積分法 (MENE コードによる), 竹内 清, 片岡 巖, 昭和42年日本原子力学会年会 昭和42年4月

$\gamma$ 線平板角度分布線源問題 (SELENE コードによる), 竹内 清, 片岡 巖, 昭和42年日本原子力学会年会 昭和42年4月

NaI シンチレーター応答関数 (1.6 MeV), 中田正也 昭和42年日本原子力学会年会 昭和42年4月

NaI シンチレーター応答関数の変化, 中田正也, 日本原子力学会昭和42年炉物理炉工学分科会

昭和42年10月  
鉄水多重層における中性子の減衰とスペクトルの変化

(Ⅱ), 布施卓嘉, 三浦俊正, 山路昭雄, 日本原子力学会昭和42年炉物理炉工学分科会 昭和42年10月

薄い板の $\gamma$ 線透過再生係数に寄与する領域, 植木紘太郎, 中田正也, 昭和43年日本原子力学会年会 昭和43年3月

平面等方線源による多重層 $\gamma$ 線再生係数の測定(Ⅱ) 片岡 巖, 伊藤泰義他, 昭和43年日本原子力学会年会 昭和43年3月

NE 213 液体シンチレーターによる中性子スペクトル測定, 布施卓嘉, 吉村富雄, 山路昭雄, 昭和43年日本原子力学会年会 昭和43年3月

## (B) 原子力船の制御の研究

黒須 顕二

### (研究経過)

船用 BWR の動特性, 二相流の動特性の研究の他, 計算機による二次プラントの自動発進, 自動停止, 監視の自動化の実験研究を行ってきたが, 最近は原子炉の最短時間応答の研究, 統計的負荷外乱に関する最適設計, 原子炉の感度解析などの船用原子炉プラントへの最適制御理論の応用に関する研究の他, 二次プラントのデジタル計算機による直接制御 (DDC) の実験研究を行なった。

### (研究成果)

(1) 周波数応答法および相関法によって二相流のパワー・ボイド, 流量・ボイド間の伝達関係を実験的に決定した。

(2) 貫流型蒸気発生器の完全自動運転を計算機を用いて実現し, その問題点を指摘した。

(3) 貫流型蒸気発生器の計算機による直接制御を行ない, その可能性を検証し, 各種制御パラメータの影響を求めた。

### (今後の計画と問題点)

貫流熱交換器内装型原子炉の運転諸特性に関するモデル実験研究を行ない, また, プラントの最適設計によって制御系の簡単化を計り, 小型化と信頼性の増大を期待する。

### (研究発表)

#### (1) 二相流の動特性の測定

寺野寿郎 黒須 顕二 村山雄二郎  
奥村幸輝

昭和39年日本原子力学会年会 昭和39年4月  
第2回 船研研究発表会 昭和39年5月  
第5回 船研研究発表会 昭和40年11月

- (2) 貫流テストボイラのデジタル計算機による自動発停と自動運転  
 黒須 顕二 村山雄二郎 奥村幸輝  
 和田利政 小林道幸  
 船研報告 第3巻第3号 昭和41年4月
- (3) 加圧水型原子炉の給水ポンプ停止時の解析  
 村山雄二郎 小林道幸  
 第5回 船研研究発表会 昭和40年11月
- (4) 原子炉の最短時間応答  
 黒須 顕二  
 第5回 計測自動制御学会 昭和41年9月
- (5) 貫流ボイラの DDC 実験  
 黒須 顕二 和田利政 小林道幸  
 第5回 計測自動制御学会 昭和41年9月  
 機械学会動力に関する講演会 昭和42年3月  
 第6回 計測自動制御学会 昭和42年10月
- (6) 統計的入力に対する原子炉シミュレーターの最適応答  
 奥村幸輝  
 第8回 船研研究発表会 昭和42年5月
- (7) 原子炉の感度解析  
 小林道幸  
 第9回 船研研究発表会 昭和42年11月

### (C) 原子炉圧力容器の安全対策の研究

小倉 信和

(目的および概要)

水冷却型の原子炉が船用および陸用として広く実用される趨勢にあり、これらに使用される鋼製圧力容器の事故防止のための研究は一層重要性を増してきている。本研究は

- 1) 製作時における脆性亀裂発生事故
- 2) 使用時における疲労亀裂発生事故
- 3) 使用時における疲労亀裂より脆性破壊発生、伝播事故の防止対策の確立を目的としている。

これらの事故は原子炉の漏洩、破壊など重大な事故となり、大きな経済上の損失とともに原子炉の安全に対する不安感をまねくことになる。脆性破壊事故対策としては使用する鋼材、溶接材料および施工法の適切な選択基準を確立するとともに、施工と並行して、適正な非破壊検査を行なうことが必要である。また原子炉圧力容器は原子炉出力の増大に伴って、さらに大型化され重量の増大を避けるため、より高い設計応力を採用し、最終破壊条件として低サイクル疲労破壊を考えるいわゆる疲労設計が採用されている。このような技術進歩とあいまって、まず原子炉用鋼板および同溶接継手の低サイクル疲労強度を明確に把握すること

(154)

が必要である。また設計応力を上昇させ、疲労強度を基準とすることは溶接欠陥の影響がさらに重大となり、このため各種溶接欠陥を確実に検出する技術が必要になる。

疲労亀裂より脆性破壊に転移する可能性は、中性子脆化をうけた範囲内の応力集中部に想定されるが、このような重大事故を防止し、原子炉圧力容器の安全を確保するためには疲労亀裂の拡大条件を明確に把握し、各段階における疲労亀裂からの脆性亀裂発生条件を実験的に求めなければならない。

#### (1) 原子炉圧力容器の非破壊検査法の研究

神尾 昭

(研究経過)

昭和37年度厚鋼板溶接部の試験研究を行なう目的で15 MeV ベータトロンが設置され、ついで昭和40年度にベータトロン・テレビおよび断層撮影装置が設置された。本装置は従来の照射室における試験の他に、3000トン疲労試験機に設置して、断層撮影および立体撮影を行ない溶接欠陥の精密な測定を試験中の試験片について行なうことができる。断層撮影法については欠陥検出度、欠陥、精密な形状および位置測定について研究を行なった。主として複雑な形状のノズル取付部の欠陥や、割れなどに対して立体撮影などほかの放射線検査法との比較を行なった。

テレビ装置に関しては、その主要な部分である高エネルギー用蛍光増倍管の安定性の向上、蛍光面の均一性の改良などが主として行なわれた。

昭和42年度には超音波探傷装置が設置され、各種欠陥の検出度について、また放射線検査結果との比較検討を行なっている。

(研究成果)

- (1) 放射線方向に角度を有する割れに対しては、その角度が断層回転角以内にあるとき、位置の測定、検出度とも断層撮影が優れていた。
- (2) ノズル取付部など複雑な形状の溶接部の欠陥位置の測定には立体撮影よりも断層撮影が優れた結果を示した。
- (3) ベータトロン・テレビ装置による100 mm 鋼板の透過試験においては約3%から4%の透過度計識別度を得られた。

(今後の計画と問題点)

ベータトロン・テレビによる各種欠陥検出度を求める実験を各板厚について行なう。溶接部欠陥の放射線検出度と超音波による検出度の比較を行ない、また欠

陥実態との比較を行なう。テレビ透視試験における問題は蛍光増倍管、モニターなど各部における輝度コントラストが求められていない点であって欠陥検出度を精密に求めるためにはこれらの値を輝度計およびテレビ用シンクロスコープで測定する必要がある。

(研究発表)

- a) 15 MeV ベータトロンによる断層撮影, 石井勇五郎, 小倉信和, 神尾 昭, 榊 昌英, 高橋輝夫, 第5回船研研究発表会, 昭和40年6月
- b) 15 MeV ベータトロンによる断層撮影, 石井勇五郎, 小倉信和, 神尾 昭, 榊 昌英, 非破壊検査, 14巻10号, 1965年
- c) 立体撮影による欠陥の位置測定について, 石井勇五郎, 神尾 昭, 非破壊検査, 15巻8号, 1966年
- d) Layer Radiography by 15 MeV Betatron, Y. ISHII, A. KANNO, 5th International Conference on Nondestructive Testing, Montreal, Canada, May, 1967.

## (2) 脆性破壊事故対策の研究

小倉 信 和

(研究経過)

昭和38年に4000 ton 引張試験機が完成し、その後同試験機格納のための建屋の建設、荷重検出用ロードセルの取り付けなど、実験研究用設備の充実に努めた。

試験研究の対象とする原子炉用鋼板は以下の順に選択した。

- (1) ASTM A 302 B 鋼
- (2) ASTM A 212 B 鋼
- (3) ASTM A 543 鋼
- (4) ASTM A 533 鋼
- (5) ASTM A 508 鍛鋼
- (6) ASTM A 542 鋼

(1)(2)はすでに米国において原子炉压力容器用として多くの使用経験を有する鋼種であり、(3)(6)は近い将来に実用されるであろう鋼種、(4)(5)は原子力船第1船炉、最近の各発電用炉などに採用されている鋼種である。

これとは別に東海発電1号炉の製作に当っては、同炉压力容器用鋼板の脆性破壊試験を実施し、耐圧試験温度の決定と同容器安全性の評価に寄与した。

現在(1)(2)(3)(4)の鋼板に対する諸試験をほぼ終了、(5)の鋼種について実験を実施中、(6)の鋼種は購入手つき中である。

(研究成果)

- a) 脆性亀裂伝播試験の結果において A302B 鋼の亀裂阻止特性は応力  $20 \text{ kg/mm}^2$  において  $12.5^\circ\text{C}$  であった。

A212B 鋼はこれよりいく分劣り A543 鋼はかけはなれて優れた結果を示した。また A533 鋼は A302B 鋼にくらべ、いく分優れた結果を示している。

- b) 切欠付縦継手引張試験の結果では A302B 級鋼は立上り温度は  $-30^\circ\text{C}$  と予想より良好であったのに対し、A212B 級鋼は  $0^\circ\text{C}$  程度であり、両鋼種の差異は伝播試験における場合よりかなり大きい。
- c) 各種溶接欠陥を含む継手引張試験においては日本溶接協会における板厚 20 mm 鋼板の同種試験結果と比較して、板厚 100 mm 鋼板の場合著しく高温度で脆性破壊が発生している。
- d) ASTM A212B 鋼を使用した板厚効果試験(機械切削により板厚を 75 mm, 50 mm, 25 mm に減厚した際の亀裂伝播試験)の結果によれば、板厚が 50 mm を超えた場合には亀裂阻止温度はほとんど変化を示さなかった。
- e) 実験を行なった各軸種を通じて、大形伝播試験によって求められた脆性亀裂阻止特性と NRL 落重試験により求められた NDT 温度とは良好な相関を示した。これに対して V シャルビー試験の結果から上記各試験の結果を推定すること(ASME Sect. III 他の規格に現在採用されている)は極めて危険であることがわかった。

(今後の計画と問題点)

現在原子炉压力容器用としてすでに採用されている鋼種および近い将来に採用されることの考えられる鋼種(ASTM A212B, A302B, A533, A542, A543, SA336 鍛鋼)についての脆性破壊諸特性を求める試験研究は昭和43年度において一応完了することになる。しかしながら加圧水型原子炉压力容器の脆性破壊事故に対する安全性評価のために採用されると考えられる WOL 試験はまだ実施していない。昭和44年度においては従来購入した鋼材の残材を用い、WOL 試験を実施して、同試験方法を検討し、また同試験により求められる各鋼材の脆性亀裂発生特性を明らかにしたい。

(研究発表)

- a) 4,000 トンテスリグによる原子炉用厚鋼板の脆性破壊試験, 小倉信和, 大熊 勇, 三好義昭, 第2回船研研究発表会, 1965年11月
- b) 原子炉用 ASTM A 302 B 級鋼板の脆性破壊特性

- について、小倉信和、大熊 勇、三好義昭、飯高洪男、塙 武男、第5回船研研究発表会、1965年11月
- c) 原子炉用厚鋼板の脆性破壊阻止特性について、小倉信和、大熊 勇、三好義昭、第10回船研研究発表会、1968年5月
- d) 原子炉圧力容器（厚鋼板溶接容器）の製作における諸問題について、小倉信和、船研特別講演会（大阪）、1967年11月
- e) 4,000 トンテストリグについて、小倉信和、機械学会誌、第67巻、第544号、1964年5月
- f) 溶接構造物の脆性破壊事故対策における最近の問題点、小倉信和、機械学会誌、第68巻、第561号、1965年10月
- g) 厚板広幅溶接試験の欠陥が引張強度におよぼす影響、日本溶接協会原子力委員会 NDT 小委員会報告、小倉信和、1966年2月
- h) 原子炉用厚鋼板の脆性亀裂阻止特性、高圧力（日本高圧力技術協会誌）、小倉信和、大熊 勇、1968年7月

### (3) 原子炉圧力容器の疲労寿命の研究

藤井英輔

#### (研究経過)

原子炉圧力容器の溶接部ならびに構造的な不連続部が使用時に受ける繰返し荷重にたいして動的な強度上の安全度に関する資料を得るために、圧力容器構成部と同材質など板厚の試験片について低サイクル疲労試験を実施する目的で昭和40年に3000トン低サイクル疲労試験機を設置した。本試験機はその規模において、また採用した諸技術（油圧関係、制御系など）においても極めて革新的なものであったため定常運転を可能とするために多くの困難が付随した。

初年度は予備試験および試験機の各種性能調査を行ない動的特性、経年変化に対する資料ならびに各種安全装置の確認など研究を実施する上の基礎資料が得られた。その結果油圧源の増設、油圧制御系統の追加、試験機、本体の付属装置の改良、作動油の冷却装置の改良ならびに破断および停止時の安全装置などが昭和40年から昭和41年にかけて設備された。

その後、原子炉圧力容器の構造用鋼に使用される ASTM A533B を供試材として、板厚 100mm の母材ならびに溶接継手について以下の試験を用いて試験研究を実施してきている。

#### (1) 供試母材の低サイクル疲労試験

(156)

- i) 母材広幅試験片（幅 400mm）
  - ii) 母材丸棒試験片（直径 100mm）
- (2) 溶接継手の低サイクル疲労試験
- i) 溶接無欠陥継手広幅試験片（幅 400mm）
  - ii) 溶接欠陥継手広幅試験片（幅 400mm）

昭和41年度までに供試母材の静的強度ならびに時間強度に関する試験研究を実施した。昭和42年度以降、母材広幅試験と同じ寸法の溶接欠陥を含む継手試験片について時間強度を推定するための低サイクル疲労試験を実施した。溶接欠陥の種類は融合不良、スラグ捲込み、溶込不足の3つとした。

試験は繰返し最大荷重を一定とし、毎分3回の繰返し速度で  $1 \times 10^2$  回ないし  $1 \times 10^4$  回の破壊繰返し数の範囲で実施し、溶接欠陥の影響、欠陥の種類による疲労破壊への優位性、疲労亀裂の伝播について調べた。

また、直径が 96mm の母材丸棒試験片を用い、試験片の繰返変化を一定とした両振り変位制御の低サイクル疲労試験を実施し、大型試験片の低サイクル疲労強度を求め、小型試験片の結果との関係について検討を加えた。

#### (研究成果)

供試母材について静的強度ならびに時間強度に関し次のような結果が得られた。

#### A. 母材広幅試験片

- (1) 長尺試験片（100mm×150mm 角）を用いた静的引張試験の結果、圧力容器の延性破壊強度に関連する一様伸びは 10.5% であって、60~65 kg/mm<sup>2</sup> 級高張力鋼としては比較的高い値を示した。
- (2) 母材広幅試験片を幅 400mm を用いて繰返最大応力を引張強さの 80~95% とした完全片振り引張疲労試験の結果破面に多数の板表面に平行な割れが発生した。これは板厚の増大の効果と考えられる。
- (3) 塑性変形量が一定値に達した後破壊が生じる傾向を示し、従来の小型試験片の結果と一致した。破壊繰返数と初回の最大歪、いかえれば残留延性と寿命との間に一定の関係が存在する。

#### B. 母材丸棒試験片

- (1) 試験片の長手方向の平均歪（標点距離を 400mm としたとき）の伸びと破壊繰返数の間に両対数で表示すると直線関係が存在した。
- (2) 直径の変化から求められる試験片の最小断面部の平均繰返歪と破壊繰返数との関係は一部につい

て求められたが、直径が 20 mm 程度の小型試験片の結果に較べて時間強度が低くなり寸法効果の存在することが認められた。

- (3) 直径の大きさの異なった試験片についてさらに系統的な試験を行ない、今後寸法効果について明らかにする必要がある。

また溶接欠陥を含む継手試験片について現在までに得られた結果は次のようである。

- (1) 板厚中心部に作った直線状の溶接欠陥から疲労亀裂は一旦板厚方向に伝播拡大し、しだいに楕円形状から円形状に拡がる。
- (2) 疲労亀裂の進展した部分の面積が拡大し、亀裂部分を除いた実断面部の応力が引張強さに達した際に試験片は疲労破壊から剪断破壊に移行する。

この結果は母材広幅試験片の場合と破壊の過程が異なり、かなり小さい溶接欠陥の存在も破壊にいたる寿命を大きく低下させることを示す。

- (3) スラグ捲込、融合不良および溶込み不足の各溶接欠陥の間では疲労亀裂の発生伝播の優位性はないようであった。しかし試験片表面に存在する長さの大きい溶接ポンド部割れは疲労寿命を明らかに低下させ、溶接割れが形状的に疲労破壊に敏感であることを示した。

(今後の計画と問題点)

溶接継手広幅試験片の時間強度の推定試験についてさらに系統的に実施し、各種欠陥の影響を求める。溶接欠陥が溶接継手の全長に複数個所散在する場合は同じ欠陥等級であってもさらに疲労寿命を低下させると考えられ、今後の研究が必要であろう。

また極厚鋼板母材の低サイクル疲労強度、寸法効果などについて各種寸法の母材丸棒試験片を用いて調べこれらを明らかにする。

(研究発表)

- a) 3,000 トン低サイクル疲労試験機について、飯田国広、藤井英輔、根本 昭、塙 武男、竹花范平、第 5 回船研研究発表会、1965年11月
- b) 溶接欠陥を有する 100 mm 厚鋼板溶接継手の低サイクル疲労強度に関する研究 (第 1 報) 3,000 トン疲労試験機と実験結果、飯田国広、藤井英輔、三国秀三郎、梅沢一夫、北原源一、日本原子力学会第 3 回炉工学分科会、1965年10月
- c) 厚板広幅溶接試験の欠陥が引張強度におよぼす影響 藤井英輔、日本溶接協会原子力委員会 NDT 小委員会報告、1966年 2 月

- d) 3,000 ton Low-cycle Fatigue Testing Machine and Preliminary Test Results, by H. Kihara, K. Iida, and E. Fujii, 1966 Annual Assembly of I.I.W., July 1966

- e) 原子炉用 Mn-Mo 鋼厚板の低サイクル疲労強度について (第 1 報)、藤井英輔、林 慎也、根本 昭、飯田国広、第 10 回船研研究発表会、1968年 5 月

## 2. 原子力船の事故対策に関する研究

### (A) サイトの安全評価の研究

佐藤健一郎、伊 従 功

(研究経過)

サイトの安全性を討議する際の資料を整えるため、安全評価のための計算コードについて、各種のパラメータを広範囲に変えた場合の計算が行なえるものを作る作業を継続している。これは想定事故の種類と規模に応じて放出線源の強さを算出するコード、単位強さの線源による被曝線量を算出するコードおよび大気拡散によって求める地点での稀釈率を算出するコードの 3 つのコードからなる。

41年度以降の研究は、上記の計算に含まれている重要な仮定を再検討し、できるだけ実際に近い状況を仮定することによって安全評価の精度を高めることに進んだ。まず、有限の拡がりを持つ雲からのガンマ線照射線量を計算する NEAC-2206 用コードを作り、船の近くにいる人の安全性を詳しく調べた。次に、燃料溶損過程を詳しく計算するコードを作成するとともに、燃料溶損率を最小にするための出力の最適化を行なった。

(研究成果)

41年度以降の研究成果は次のとおりである。

- a) 大気拡散における等濃度線と等照射線量率線とは船の近くで相当ずれている。したがって安全評価を実際に近づけるためには、この点を考慮する必要がある。
- b) 有限雲からの照射線量率を計算する計算式は複雑であるから、風下中心線上の照射線量率を求める簡便式を導いた。
- c) 入港前の出力履歴を最適化することによる崩壊熱の最小限界を示した。
- d) 燃料棒溶損時刻と出力履歴との相対的な関係を示す式を導いた。
- e) 水-金属反応熱が燃料溶損にどの程度影響するか米国アルゴンヌ国立研究所の研究結果にもとづき、水蒸気が無限に与えられるとの条件下で計算により

示した。

- f) 燃料棒被覆内圧計算のために、核分裂生成気体の内蔵量総計に対する核種の寄与が 99% 以上になる 55 種の核種を選定した。また 55 核種について親-娘系近似計算をするためのデータを編集した。
- g) 燃料溶損過程に関連して、崩壊熱計算のための短寿命の核種のデータがパーキンス・キングのデータには与えられていない。崩壊熱の実験結果にあうように仮想核種 12 種のデータを定めた。

(今後の計画と問題点)

現在原子炉の想定事故としては、一次系破断をとるのが普通であるが、その際の放出放射エネルギーの算定は、経験皆無なためと計算困難とのために極端に安全側になっている。これを精密に求めようとする努力も行なわれているが、それによって現在想定される放出量よりも数桁小さく見積ってもよいというような結論になることは期待できない。

したがって人口稠密地帯に接近せざるを得ない原子力船では、放出放射性物質を押える安全施設の開発が不可欠の問題であろう。

今後は船体と格納容器との二重格納構造の有効性、圧力抑制型格納容器などの理論的研究などを行なう予定である。

(研究発表)

- 1) 原子力船の入港時核分裂生成物内蔵量を最小にする船速について、伊従 功, 第 2 回船研研究発表会 昭和39年 5 月
- 2) 原子力船の安全評価のための計算コード, 佐藤健一郎, 中田正也, 伊従 功, 第 2 回船研研究発表会 昭和39年 5 月
- 3) 有限な拡がりの汚染雲による被曝線量について, 佐藤健一郎, 第 2 回船研研究発表会 昭和39年 5 月
- 4) 原子力船事故時の災害防止距離計算コード, 佐藤健一郎, 伊従 功, 野間口道義, 第 4 回船研研究発表会 昭和40年 6 月
- 5) 原子力船の放射能内蔵量および崩壊熱におよぼす出力履歴の影響, 伊従 功, 船研報告第 2 巻第 4 号 昭和40年 7 月
- 6) 冷却水喪失事故後の燃料棒被覆破損時刻におよぼす出力履歴の影響について, 野間口道義, 第 6 回船研研究発表会 昭和41年 5 月
- 7) 放射性雲からガンマ線被曝線量を計算する NEAC-2206 用コード, 佐藤健一郎, 伊従 功, 伊

藤泰義, 山路昭雄, 第 7 回船研研究発表会

- 昭和41年11月
- 8) 有限雲による被曝線量の一整理式, 伊従 功, 山路昭雄, 伊藤泰義, 第 7 回船研研究発表会 昭和41年11月
  - 9) ステンレス・スチールとジルカロイ-2 被覆の冷却水喪失事故後温度変化の比較, 野間口道義, 第 7 回船研研究発表会 昭和41年11月
  - 10) 二重原子炉区画方式による放射能保持効果の向上について, 伊従 功, 野間口道義, 植木紘太郎 第 7 回船研研究発表会 昭和41年11月
  - 11) 原子力船の崩壊熱を最小にする最適出力履歴, 伊従 功, 日本原子力学会昭和42年炉物理炉工学分科会 昭和42年10月
  - 12) 燃料溶損率を最小にする出力履歴, 伊従 功, 第 9 回船研研究発表会 昭和42年11月
  - 13) 多重格納系の自然冷却, 伊従 功, 野間口道義 第 9 回船研研究発表会 昭和42年11月
  - 14) 汚染雲からの吸収線量を計算するためのコードおよび原子力船のための数値計算例, 佐藤健一郎 伊藤泰義, 伊従 功, 山路昭雄, 船研報告第 5 巻第 2 号 昭和43年 3 月
  - 15) 有限の拡がりをもつ雲からの  $\gamma$  線吸収線量を与える近似式, 伊従 功, 伊藤泰義, 山路昭雄, 昭和43年日本原子力学会年会 昭和43年 3 月

## (B) 原子力船の原子炉区画構成の研究

佐藤健一郎, 伊従 功

(研究経過)

本研究は原子炉区画壁などを後備安全防護壁とし、これと格納容器とを効果的に組み合わせた船用格納方式を開発しようとするものである。

昭和39年度以降、一連の安全解析用計算コードを製作し、原子力船の安全解析を行なった結果、サブナ型の原子力船では事故時に核分裂生成物が燃料内から船外に漏れ出るまでの時間おくれは、ある意味ではかなり小さいことが示された。そして原子炉区画を含めた格納系の改良を行なうことにより核分裂生成物の船外放出の時間おくれを大きくし、船を港外へ退去させるときの時間的余裕を大きくすると原子力船の安全性が著しく向上すると予想された。そこで、陸上炉で考えられている種々の安全防護施設を船用化することが考えられたが、これと平行して二重原子炉室のように船体構造を利用した船特有の格納方式の可能性を指摘

した。

昭和41年度には二重原子炉室の理論的研究を電子計算機によって行ない、核分裂生成物の船外漏洩におよぼす炉室体積の影響、中間隔壁の位置および漏洩率の影響、格納系内の圧力および温度の経時変化を調べた。

昭和42年度には実験的研究の第1段階として、多重格納系の小型模型を作製し、予備実験に着手し、多重格納系内の対流、混合などの現象を観察した。

昭和43年度には模型による研究成果を実船へ外挿、または橋渡しするに不可欠の中型模型を作製し、多重格納系の性能と特性を把握するための実験を開始する予定である。

なお本研究はサバナ型（一重原子炉室）の格納系の研究および漏洩率測定法の研究をその一部として必然的に含むものである。

#### （研究成果）

昭和41年度以降に行なった理論的研究の結果、次のことが示された。

- a) 事故後の10時間以内に二重原子炉室から船外へ放出される核分裂生成物の総量を、一重原子炉室の場合と比べて100分の1に抑えるのは容易である。
- b) 一重炉室の場合には格納容器から洩れ出た汚染ガスは1次遅れの形で船外に出てくるが、炉室を二重化すると2次遅れの形で船外に出てくるようになるので、事故後のある時間にわたって船外に出てくる汚染ガスの量をゼロにすることができる。
- c) 炉室を二重化すると格納容器の自然冷却効果は小さくなるが、船用格納容器のように熱貫流率の小さい場合には、冷却効果は事故後の数時間を問題にする限りでは、一重炉室のときと事実上同じである。
- d) 格納容器の自然冷却速度は格納容器壁の熱伝達率に強く影響される。

#### （今後の計画と問題点）

二重原子炉室を有する船用格納系の中型模型が昭和43年度中に完成するので、中間隔壁を付けた構成では二重原子炉室の研究を、また、中間隔壁を外した構成では一重原子炉方式の研究を行なう。

研究の主なる目標は次のとおりである。

- a) 拡散する核分裂生成物の濃度分布は洩れ出るときの濃さを与えるものであるから、濃度分布を実測する。

- b) 換気と対流の様相および両者の相互作用を明らかにする。
- c) 格納容器のような形が複雑で大きなものの熱伝達率を詳しく求める。
- d) 寸法効果を調べ、実船に応用するための解析法を確立する。そのために温度と濃度分布の測定点を増す。
- e) 事故条件に近い状態を実現して漏洩率を測定する。また、漏洩率を常時精度よく測定する方法を開発する。

本研究は数個に仕切られた空間内の拡散、対流、混合、伝熱などの現象を模型実験によって把握しようとするものであるから、各空間内での温度と試料気体の濃度を平均値としてではなく分布として測定し、現象を正しく理解することが極めて重要である。これは、解析法の確立のためばかりでなく、その方向づけの段階においても必要なものであるから、今後は温度の測定点を40個程度に増すとともに、拡散する試料気体の濃度を連続的に測定しようようにしたい。

また、昭和42年度に行なった小型模型による研究によると、格納容器壁の温度分布は容器内に蒸気が存在するかどうかで非常に違ったものになるので、昭和43年度に製作する中型模型には蒸気源と崩壊熱模擬装置（電気加熱）とを昭和44年度以降に追加したい。

なお、本研究では気密容器を製作するので、漏洩率の計測を行なう関係上、漏洩率測定法の開発も同時に試みたいと考えている。

#### （研究発表）

- 1) 二重原子炉区画方式による放射能保持効果の向上について、伊従 功、野間口道義、植木紘太郎、第7回船研研究発表会 昭和41年11月
- 2) 二重原子炉室の貴ガス保持効果、伊従 功、日本原子力学会42年年会 昭和42年4月
- 3) 多重格納系の自然冷却、伊従 功、野間口道義、第9回船研研究発表会 昭和42年11月

#### （C）厚子力船の損傷時復原性の研究

高石敬史、吉野泰平

#### （研究経過）

原子力船の損傷時における船体運動学上の諸問題を取り扱ってきている。

昭和41年度以前においては、損傷を受け浸水、沈没する船体の水中における運動沈降速度および姿勢を模型実験により観測した。

昭和42年度においては、損傷を受け、浸水により前または後にトリムした場合や、左右に傾斜した場合の操舵に対する応答、傾斜を原子力第一船の模型を用いて実験的に測定した。この実験結果は目下解析されつつある。

昭和43年度においては、同じ模型船につき浸水時の動揺と海水の打ち込みに関する実験を行ない、浸水から沈没に至る機構を明らかにしようとするものである。

### 3. 船用原子炉の振動動揺対策に関する研究

高田良夫

#### (研究経過)

船体の振動が原子炉機器におよぼす影響と、波浪による船体動揺が水冷却原子炉の熱流力特性におよぼす影響の二つに重点をおいて研究を進めてきた。

前者については船用燃料集合体の振動実験を実施し、第一船用燃料の構造設計に寄与した。

後者については管群燃料棒を有する水路模型における傾斜時のヒービング状況、熱限界の測定などを行なった。また一方において、水冷却炉心水路を簡単なモデルで置き換え、電子計算機による理論計算を行って、その動揺時の流れの脈動やボイドの脈動に関する理論的考察を行ない、前記実験とはよく一致する理論結果を得た。

40年度から従来より問題になっていた高圧ループに対する実験に着手し、10気圧まで与圧した小型ループに対する実験結果が低圧および理論とよく合うことを認めた。

また昭和42年度から大型上下動揺実験装置の建設に着手し現在進行中である。

#### (研究成果)

##### 第一船用燃料集合体の振動実験

燃料集合体の実尺模型を製作し、これに大型振動試験機によって船上で予想される振動加速度を加えて、各部分の応力を測定した結果次のことが明らかになった。

- 横方向の加速度に対して共振点がある。
- ノズル部分の剛性を増加させることによって共振点を使用範囲より高いところに移すことができることが、実験的に確認された。
- 自然振動数は梁理論による計算で予測することができる。

(160)

#### 上下動揺の燃料要素の熱限界におよぼす影響の研究

この研究の結果、さらに次の諸事実が明らかになった。

a) 船のヒービング運動によっ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し、その減少率は、自然循環のときに最も大きく、強制循環時には流速の大きいほど減少率が小さい、しかし、1m/s程度の流速では、まだかなり減少する。

b) ヒービングにより、流速の変動率が最大となる共振周期が存在する。その周期は、水が流路を下から上まで流れるに要する時間の約2ないし3倍であり、実在する海上波の周期内に存在し得る。

c) ヒービングによって、気泡の脈動的発生を防止するためには、炉心出口水温を、ある限界値以上サブクールすればよい。

この限界値を、限界サブクールと呼ぶと、この限界サブクールの値は、通常1°Cないし10°Cまでの値であり、原子炉の型式は、飽和に近い加圧水型炉がこれに近い値を有する。

d) 循環流を増すことは、動揺やヒービングによる気泡の脈動発生を低下に最も効果的であり、その他、流路高さを減少させることや炉心内冷却水回路(パス)数を増すことも効果がある。

e) 熱限界に大きな影響を有するボイドの挙動を明らかにするため空気と水との混合流に加速度を加えて実験した。

以上の研究成果は、前年度の概要に記載された諸成果とともに、その一部は、原子力第1船の仕様設計にも取り入れられ、最も懸案とされた炉心出口水温の決定に重要な根拠を提供したが、実際の炉の設計に対しても十分考慮されることと思われる。

f) 高圧ループによる実験によれば10気圧までの実験範囲ではボイドやバーンアウト熱負荷への動揺の影響は低圧のときより小さい。

#### (大型上下動揺実験装置の建設)

上下動揺の研究は従来は小型の装置によって行ってきたが、その容量に制約があり、さらに研究を進展させるためには、実用炉と同程度の高圧の水ループに、十分な計装を設けて実験を行ないような大型の装置が必要になった。

42年度に大型上下動揺実験装置および建家の予算が認められ、43年3月装置本体、駆動装置が完成した。

装置は支柱の間を上下に運動する試験架台を有し、その大きさは、1.3m×2.5m×高さ3.2mで1800kgの重量のものまで搭載可能である。

駆動方法は上記試験架台を2本の鋼索によって引張り、これを滑車によって1/4の行程として、油圧ピストン機構によって駆動するものである。駆動機構には試験体の重量を補償するためのバランス空気シリンダ2本と、駆動動力を軽減する目的のエネルギー回収用空気シリンダ2本が含まれている。別に空気系統、油圧系統があって駆動部に所定の圧力の空気、油を供給する。

建家はRC230m<sup>2</sup>で、装置を収納するため軒高を12mとしているが、将来長い試験体の実験を行なう場合も考慮して、一部分天井をさらに3m高くしてある。

装置は試験の結果所期の能力を有することが明らかとなったが、43年度上記のものにローリング装置を付加し、上下動とローリング運動を同時に実験できるようにする。また試験台の運動を検出して、これを油圧駆動装置にフィードバックする制御装置を付加する。これが完成すれば、最大ストローク4.4m周期2.7～15秒、最大変動加速度1.2gの正弦波について実験できるようにする。

昭和44年度に予算が認められれば、不規則波信号発生装置をさらに付加して、これにより制御装置に実際に海上で観測された船体運動の信号を送って、考えられるあらゆる条件に対応する実験が行ないうようにしたい。

#### (今後の計画と問題点)

上記大型上下動揺実験装置により動揺対策の実験を行なうべく準備を進めている。すなわち43年度高圧水ループの製作を動揺装置の製作と併行して行ない、計測の予備実験を行なう。計測についてはループ内の気泡の挙動が最も問題となるが、従来の大気圧ループのように写真により直接観測することは困難なので、44年度においてガンマ線を利用して測定する計器を得たい。また焼損熱流束の測定のためバーンアウト検出器を必要とする。

上下動揺の影響の解明は、水冷却原子炉の軽量小型化の最も重要なポイントの一つであるので、電子計算機による解析的研究が内外で進められているが、このような複雑な現象は実験的裏付けを必要とする。

かかる解析的研究と併行して、上記装置に計装、リアクターシミュレーターなどを付加して、加圧方式、循環方式、流路の数、ボイド反応度係数などの因子が上下動揺の影響にどのような相関を有するかを順次明らかにし船用炉の性能向上に熱設計の面で寄与したい。

また、船用炉実用化にともなってあらわれるであろう機器の耐動揺性のテストにも、上記の装置が有効に活用できるものと思われる。

#### (研究発表)

船用水冷却原子炉の熱、流力特性におよぼす動揺の影響とその対策、一色尚次、日本機械学会誌(技術論文)、68巻553号 昭和40年2月

船用水冷却原子炉の熱限界と流力特性におよぼすヒービング、傾斜などの影響とその対策、一色尚次、村山雄二郎、塚原茂司、和田利政、川俣善正、山口勝治、中田正也、御手洗若男、横村武宣、堀田秀夫、船研報告第2巻第1号 昭和40年1月

船用水冷却原子炉の熱設計について、一色尚次、造船協会誌、426号 昭和40年1月

船用原子炉水冷ループの特性とその研究開発、一色尚次、第3回原子力総合シンポジウム要旨集 昭和40年2月

Studies and Considerations on the Effects of Heaving and Listing upon Thermo-hydraulic Performance and Critical Heat Flux of Water Cooled Marine Reactors, Naotsugu Isshiki 船研欧文報告 No. 10 昭和41年3月

船用炉の振動動揺特性について、一色尚次、原子力学会誌 昭和41年3月

船用燃料集合体の振動実験、高田良夫、江草竜男、原子力学会42年年会要旨集

Vibration of the Fuel Assembly of a Marine Reactor Nuclear Engineering and Design, Yoshio Takada, Tatsuo Egusa, Vol. 7 No. 6

並列加熱流路における上下動の影響、一色尚次、山口勝治、第9回船研研究発表会 昭和42年11月

## 4. 原子力船の振動動揺対策に関する研究

### (A) 原子力船の不規則波中における異状加速度の研究

山内保文 高石敬史

#### (研究経過)

原子力船の原子炉が船体の波浪中動揺によってうける動揺や加速度の性質をその異常値の大きさも含めて

正確に推定するために行なわれている研究である。

昭和41年度までは、不規則波を水槽に発生させるための制御装置を着々整備し、不規則波発生技術、不規則波中における不規則現象の解析理論や解析技術の確立に努めてきた。

昭和42年度では、これらの成果の上に立って原子力第1船を対象とし、水槽模型実験により波浪中の異状加速度の推定研究を実施した（日本原子力船開発事業団と共同研究）。

（研究成果）

規則波中および不規則波中における模型実験と別に行なわれた理論計算とから、

- a) 原子力第一船の波浪に対する応答特性を求め、船速、波との出会角の影響を明らかにし、理論計算値との一致度を確かめ、
- b) 有義波高が9.4mに達する暴風海面で受ける動揺、加速度の異常値の分布を求め、従来の普通船舶を対象とした研究結果と比較するとともに、速度低下も推定し、
- c) 本船が一年間あるいは一生のうちに一度出会う確率の最大動揺、加速度の値を推定し、
- d) この最大値が原子力第一船の安全に対する設計基準値以内であることを確認し、
- e) また、横方向加速度や横揺れが当初の予想より大きいことを明らかにするなどの成果を得た。

（今後の計画と問題点）

- a) 波浪と応答との関連を位相を含めて明らかにするためには、波を船との出会いごとに連続して測定することが必要である。昭和42年度における予算により出会波浪計を新しく開発して目下予備実験中である。今後これを用いた不規則波中の実験を、原子力船を対象として行なうつもりである。
- b) 原子力船の上下加速度に対して、横加速度が同じ程度か場合によってはそれより大となり得ることが示されたので、今後は横揺れ減少装置が横加速度の減少に与える効果を調査研究してゆく必要がある。
- c) 原子力船の不規則波中における推力変動を模型実験により推定したが、実船に適応するデータを得るためには、模型船のエンジン特性を実船と相似にして、実験を行なう必要がある。
- d) 斜め不規則波中の模型実験を行なう場合、パラメータが非常に多く実験点も普通の水槽試験の数十倍に達するので、実験と解析を能率よく、しかもつねに実験結果を追跡しながら行なう必要がある。この

ため昭和43年度においてはデータ処理装置を購入し、処理速度を高め、かつ自動化するが、さらに模型船とデータ処理装置とをテレメータにより直結すること、実験中容易に不規則波発生制御を自由に遠隔操作することなどが企てられている。

- e) わが国の原子力船が航行する日本近海、北太平洋などの海域の波浪特性、とくにそのスペクトラムの形をとらえる正確な観測資料が切望される（原子力第一船について行なったのは、観測値のそろっている北大西洋に対してであった）。

原子力第二船以降の船型の一つとして、高速貨物船船型を選び、これのうける加速度特性、その減少法を、上記の問題点を解決しながら研究を進めて行きたい。

（研究発表）

- a) 原子力第1船の波浪中動揺と加速度について、山内保文、大井 浩、高石敬史、木原弘毅、吉野泰平、飯塚正文、日本造船学会春季講演会 昭和43年5月
- b) 三鷹第1船舶試験水槽に付属する新しい施設（不規則波発生制御装置、動揺水槽）とその目的について、山内保文、第9回船研研究発表会 昭和42年11月

## （B）原子力船の衝突回避に関する操縦性の研究

森 信 篤，小川 陽 弘

（研究経過）

原子力船の衝突回避を主眼とする船体運動学上の研究である。

昭和42年度は、原子力第1船を対象にして衝突回避の基本的性能として旋回性能、方向安定性能、停止性能、後進性能を模型実験的に試験研究した。また、別に述べるように、損傷浸水時の操縦性能も模型実験で研究した。

（研究成果）

原子力第1船について次のような点を明らかにした。

- a) 船型はかなり冴せているが、操縦性は肥えた船に近く、旋回力は強いが追従性、進路安定性が普通型貨物船に比べて劣ること。
- b) 後進時には、進路不安定となるとともに、右回頭偶力を生じ、普通右へ回頭旋回して停止するが、左へ旋回することもある。

（今後の計画と問題点）

- a) 衝突回避のための船の操縦性に要求されるのは、静止あるいは動く対象物に対して最適の進路をたど

るよう船の操舵あるいはエンジンの操縦を行なう必要がある点である。そのため操舵に対する船の応答を知るばかりでなく与えられた応答あるいは与えられた進路を進むためにはいかなる操舵をするのが最適であるかを定める研究が必要である。そのために操舵直後の初期旋回運動や小舵角時の応答を詳細に調べるとともに、最適制御を行なうために船の応答特性を考慮に入れた計算機制御の方法を開発する必要がある。

昭和44年度以降はこの線に沿って研究を進めるつもりである。

(研究発表)

原子力第1船の操縦性能模型試験, 森 信篤, 野中 晃二, 山本徳太郎, 第9回船研研究発表会

昭和42年11月

## 5. 原子力潜水商船開発に関する調査研究

田中 拓

(沿革)

船舶技術研究所における潜水船の研究は、昭和31年頃からはじめられた。当所ではそれまでに、軍用の潜水艦などの水槽試験の経験がなかったため、最初は主に没水体模型の水槽試験法の研究に力が注がれた。この結果本格的な潜水船の研究に着手した昭和34年春までに、没水深度2m、長さ6mの大型大深度の抵抗試験が実施できるようになり、また4m模型による3分力試験および強制動揺試験などの予備的実験も完了した。

本格的な潜水商船の研究は、昭和34年度より原子力予算などによって実施された。この研究は、原子力予算としては、昭和38年まで継続されたが、この間に約15,000千円の費用で、目白第2水槽を使用して下記の研究を実施した。

(A) 主な研究題目

潜水船の推進性能の研究 (34~37年度)

潜水船の縦安定性能の研究 (34年度)

潜水商船の経済性に関する研究 (37~39年度)

(B) 主な研究施設

没水体用抵抗動力計 (34年度)

没水体用自航動力計 (34年度)

強制動揺試験機 (35年度)

没水体用5分力動力計 (35年度)

昭和39年度以降は、原子力予算による研究費が途絶したので、実質的な研究は実施していない。

(研究経過)

潜水商船研究の初期には、この種の没水体の基本的な性能である、水中抵抗、水上抵抗、縦安定性能(深度安定性能)などに関する資料と模型実験に対する経験が皆無であったために、これらの研究に重点をおいた。

この後、潜水船を商船として使用する場合の最適な船型の研究と、基本設計的観点から、浮上喫水、重心位置、貨物比重、一般配置、潜航深度などの検討をおこなった。これらの研究は川崎重工業(株)潜水艦設計部と共同で実施したものであるが、さらに具体的な潜水タンカー設計の仕様をまとめ、水槽試験、基本設計、建造費、運搬費などの資料を作成し、潜水商船の経済性を検討した。

(研究成果)

潜水船の種類としては、下記のものが考えられる。

(A) 排水、全没型潜水船

(B) 排水型半潜水船

(C) 非排水型半潜水船

また上記とは別に、

輸送用の潜水商船

作業用の潜水船

の区分も考えられる。

潜水船は、もともと非水上船の総称であるが、潜水船、半潜水船ともに、水上船に較べて著しく異なっているのは、載貨重量のいかにかかわらず、一定の浮上喫水を保つ必要があることである。したがって、予備浮力としては、排水型では、ballast tank、非排水型ではfnのような、揚力を発生する設備をもっている必要がある。

船舶技術研究所では、これまで、排水、全没型の潜水商船について研究をすすめ、下記の成果を得た。

(A) 潜水船の推進性能

抵抗試験法を研究し、大型模型による抵抗の計測を実施した。潜水船の船型を考える上で重要なのは、

1) 表面積が大きくなること。

2) 浮上喫水が小さいこと。

3) 副部の抵抗が少ないこと。

4) 浅い潜航深度では、造波抵抗、ピッチングモーメントが小さいこと。

などが考えられ、これらの観点から矩形断面の潜水船型を開発し、シリーズテストを行なうとともに各種の性能を調べた。

(B) 潜水船の縦安定性能

潜水船の深度安定性能は、最も基本的な性能の一つであるが、潜水船の縦運動方程式の係数を求める水槽試験法を研究した。この結果、潜水船は、横舵またはfinの設計が適当であれば、高速においても十分安定に潜航できることがわかった。しかし矩形断面潜水船が、浅い潜航深度で航行する場合の検討は十分行なわれていない。

### (C) 潜水商船の設計および経済性

矩形断面潜水船のうち、推進性能最良のものについて

載貨重量 20,000~40,000トン  
連続最大出力 20,000~120,000 軸馬力  
(速力、約15ノット~30ノット)

の範囲で潜水タンカーについて試設計をおこない、経済性の評価と、潜水船全般の見透しを検討した。

経済性の指標としては、資本回収率および Payload Cost (DW トン当り運送コスト) を用いたが、最も経済性の高い潜水タンカーの速力は、16ノット前後であることがわかった。また全般的な経済性も、原子力水上タンカーよりもさらに悪い。

このように、潜水タンカーの最適速力が、初期の研究で期待されたほど速くないのは、原子力水上タンカーにも共通していえることで、排水型船舶の基本的性質として理論的にも理解することができる。

### (今後の計画と問題点)

航洋船舶を飛躍的に高速化したいという希望は、最近の造船技術の進歩と、海運界の機運とによって、次第に現実のものに近づきつつある。しかし在来型、航洋商船の高速化は、経済性を考慮する場合限度があることは、多くの研究によって示されており、この障壁を乗り越えて造船海運の夢を適えるものは、原子力の利用以外にはないと思われる。しかしながら、単なる主機を交換しただけの原子力船もまた成立しないことは、原子力水上船、潜水船の研究に示されており、原子力商船に適した船種、船型の研究を着実に実施する必要性が痛感される。さし当り44年度の研究題目として、超高速の船に適した船型の一つとして、半潜水船の研究を行ないたいと考えている。特に半潜水船の抵抗および縦安定性能、喫水保持性能を調査する必要がある。またこの間に、動的な揚力が、商船の総合的な性能向上に与える影響を調べることも将来の高速船研究には重要な問題点となると思われる。

このようにして、潜水型、半潜水型および在来型の各商船を比較検討し、海運における超高速船の運用法

を組織的に研究することが、原子力商船の進路を定める現段階の最も重要な課題である。

### (研究発表)

- 1) 潜水タンカーの経済性に関する研究, 黒田七郎, 田中 拓, 上田隆康, 隆杉憲行, 造船協会論文集第117号 (昭和40年)
- 2) 将来船研究の方向, 田中 拓, 自然, 昭和40年6月号
- 3) 潜水船研究の展望, 黒田七郎, 田中 拓, 造船協会会報, 第455号 (昭和42年6月)

## 6. 軽水船用炉の熱流力的研究

### (A) 第1船炉心構造模型, 燃料要素模型実験

高田良夫

#### (研究経過)

試設計第1船の原子炉につきその熱流力的特性を明らかにし、設計の妥当性を検討することを目的にして実尺の燃料要素模型, 1/2縮尺の原子炉压力容器模型およびこれに付随するループを製作し, 昭和40年10月から実験を開始した。なおこの研究は日本原子力船開発事業団との共同研究で行なわれたものである。主な実験項目のうち, (1)蒸気発生器のプレナム模型圧力損失の測定 (1/2模型), (2)燃料要素内圧力損失および流速分布の測定 (実尺模型), (3)炉心構造模型内圧力損失および流量分布測定 (1/2模型) を41年6月末日まで完了した。引き続き, (4)炉心模型下部プレナム室内の混合率の測定 (1/2模型), (5)流量減衰特性の測定, (6)自然循環能力の測定, (7)燃料集合体内の混合率の測定 (実尺模型) について実験を行ない, 全測定を41年12月末日をもって終了した。

#### (研究成果)

上記各項目につき記すと, (1)熱交換器プレナム室内の各部の圧力降下は計算値とよく一致する。(2)燃料要素内の圧力降下は実測値が計算値よりやや低く安全側にある。流速分布は入口付近では流速の不均一性がみられるが, 熱中性子束が最大となる中央から下流にかけては十分均一であるから熱限界に関係あるエンタルピー上昇が非常に不均一になるおそれはない。(3)炉心模型内の圧力降下は実測値が設計値よりやや低く, 安全側にある。流量分布は歪のすくない良好な結果が得られた。(4)2ループからの冷却材流量比を温度分布測定から求め, 両ループからの流入混合状態はかなり対称性があることが認められた。(5)循環ポンプ停止後の流量変化の測定を行ない, 本船の安全解析のため計

算した値とかなりよく一致した。(6)炉心と熱交換器との間に温度差を設け自然循環量を測定し (4)配管などよりの放熱損失は無視し得る。(5)自然循環時の流量が  $Re$  数 $-10^4$  以下では流路の抵抗の自乗に比例すると推定することは危険側の評価である。(7)燃料要素内の流体混合効果を測定し、混合による熱水路係数を推定し、 $F\Delta H$  として 0.98 をとれば安全側の評価となることが判った。

以上記したごとく、原設計で採用された設計上の諸係数は十分妥当性のある結果が得られた。

(今後の計画と問題点)

本研究は原子力第 1 船用原子炉の設計に関連して行なったもので上述のような成果が得られた。今後作られるであろう船用原子炉についても、他の分野の研究と平行して熱流力学的研究が必要である。

(研究発表)

原子力第 1 船用原子炉に関する模型実験報告書、日本原子力船開発事業団、1967年 3 月

原子力第 1 船用原子炉に関する模型実験

- |                                 |        |
|---------------------------------|--------|
| (1) 概要                          | 高田良夫 他 |
| (2) 炉心構造模型内圧力損失および流量分布の測定       | 手島 登 他 |
| (3) 燃料集合体模型内の圧力損失および流量分布の測定     | 岩井正三 他 |
| (4) 自然循環能力の測定および燃料集合体模型内の混合率の測定 | 黒沢 明 他 |
| (5) 流量減衰特性の測定および模型実験と本船設計との関係   | 横村武宣 他 |

以上 5 編 昭和43年日本原子力学会年会要旨集、昭和43年 3 月

## (B) 軽水船用内装貫流式蒸気発生器に関する研究

高田良夫

(研究経過)

本研究は日本造船研究協会と船研との共同研究として、昭和 42, 43 年度において行なわれるものである。

42年度には表記型式の蒸気発生器を内装する模型を製作し、熱源として当所機関性能部の蒸気ボイラーを使用して、伝熱管の沸騰熱伝特性、流力的特性を明らかにした。管は外径 21.6mm のステンレス管で、局所的熱伝達特性を明らかにするため、有効長約 4m の管に 3 箇所タップを設け、弁切りかえにより各セクションについて実験した。沸騰部の計測に重点をおき、2 次側の圧力および蒸気重量率を広範囲に変え、管の

内外壁温度および 2 次側出口に設けたカロリメータの計測結果から熱伝達係数を求めた。

(研究成果)

以上の実験により次のことが明らかとなった。

- 管内圧力 21~15 kg/cm<sup>2</sup>g, 質量速度 486~162 kg/m<sup>2</sup> sec, 熱流束 180000~130000 Kcal/m<sup>2</sup>h の範囲において、沸騰部の管内熱伝達係数は 20000 Kcal/m<sup>2</sup>h °C 程度で、ほとんど一定であり蒸気流量率の影響はあまり受けない。
- 圧力損失は Martinelli-Nelson 法で求めた計算値とよく一致し、伝熱管であることの影響は認められない。
- ドライアウトは流量の減少とともに低い蒸気重量率で起る傾向を示し、曲り管の外側の方が内側より低い蒸気重量率でドライアウトが発生する。

この研究で得られた沸騰部の熱伝達係数の値は従来の解析的評価に使用されていた値より高く、本実験の結果を採用すれば伝熱面積を節約して小型の蒸気発生器を設計することが可能になる。

(今後の計画と問題点)

昭和43年度には上記実験装置の一部に改造を加え、蒸気発生器の総合特性を明らかにする研究を行なう。すなわち 42 年度は主として沸騰部の研究を行なったが、43年度においては管全長を 45m とし、予熱部、沸騰部、過熱部をすべて含む実用の炉に近い状態で、1 次、2 次圧力、2 次側流量をパラメータとして総合熱流特性を明らかにする。また 2 次側に給水制御器を設けて、種々の制御方式を試みその応答性を検討する。

本研究は昭和43年度を以て完了する。

(研究発表)

「軽水船用炉用内装貫流式蒸気発生器に関する試験研究」実績報告書、日本造船研究協会、昭和43年 5 月

## (C) 軽水冷却原子炉循環方式に関する研究

高田良夫

(研究経過)

軽量小型の船用原子炉を得るには適切な循環方式を採用する必要がある。そこで陸用炉も含め広く軽水炉一般の各種循環方式につき、ポンプ動力、機器の大きさなどの面から実例について調査した。

(研究成果)

パラメータ計算を行なって、各種方式の利益得式を明らかにすることができた。

(今後の計画と問題点)

上記調査の結果を上下動揺の研究、船用炉の運転特性に関する研究の詳細計画立案の基礎資料の一つとしたい。また循環用の機器の特性について実験的研究を実施する予定である。

(研究発表)

軽水冷却原子炉循環方式の検討 高田良夫, 手島登  
第10回船研研究発表会 昭和43年5月

## 7. 放射線利用に関する研究

### (A) アイソトープによる非破壊検査法の研究

神尾 昭

(研究経過)

昭和36年度  $^{60}\text{Co}$  50 キュリーが設置され、以来主として大容量  $^{60}\text{Co}$  による厚鋼板溶接部の非破壊試験研究を行ってきた。また国産  $^{192}\text{Ir}$  の試用試験を行ない、主として割れ検出度を他の方法と比較した。

透過写真の微細な濃度変化を測定するため、ミクロホトメータが昭和38年度に設置され、ついで昭和40年度に濃度目盛回路が設置された。欠陥検出について基礎的な問題である透過度計の識別度と欠陥検出度、識別限界濃度差と像の大きさなどについて研究を行なった。

(研究成果)

- 1) 大容量コバルト撮影における散乱線の発生とその影響をしらべた。
- 2) 散乱線が透過写真コントラストにおよぼす影響をしらべ、その悪影響を減少させる方法をしらべた。
- 3) 像質計の識別限界濃度差と像の大きさの関係、像質計と欠陥識別度などの関係をもとめた。

(今後の計画および問題点)

各種像質計の比較、像質計と欠陥検出度についての実験を行なう。像の識別限界と観察条件の関係は明らかでないので輝度変化範囲の広い観察装置によりこの関係をしらべる。

(研究発表)

- 1) ろう付部の中性子線透過検査, 神尾 昭, 第3回船研研究発表会, 昭和39年11月
- 2) 透過度計識別度と割れ検査度について, 神尾 昭 榊 昌英, 高橋輝夫, 第5回船研研究発表会, 昭和40年11月
- 3) 大容量コバルト  $60\gamma$  線による透過写真検査について, 石井勇五郎, 神尾 昭, 榊 昌英, 高橋輝夫, 船研報告 第2巻第3号, 昭和40年5月
- 4) 透過写真検査における透過度計識別度と割れ検出

(166)

度, 石井勇五郎, 榊 昌英, 神尾 昭, 非破壊検査  
16巻5号, 1965年

- 5) ろう付部の非破壊検査, 神尾 昭, 非破壊検査  
14巻3号, 1965年
- 6) 散乱線のコントラストにおよぼす影響について, 神尾 昭, 榊 昌英, 勝又健一, 第7回船研研究発表会, 昭和41年11月
- 7) 散乱線のコントラストにおよぼす影響, 神尾 昭 榊 昌英, 非破壊検査 16巻6号, 1967年6月
- 8) 像質計の識別限界濃度差について, 神尾 昭, 榊 昌英, 勝又健一, 第9回船研研究発表会

### (B) アイソトープを利用する摩耗の研究

石川健三郎

(研究経過)

自動車などに用いるブレーキ材は、耐熱性および耐摩耗性に対する要求が苛酷になってきているので、この材質の改善をはかるため、 $\gamma$ 線照射により有機ライニング(レジンモールドおよびゴムモールド)のフェノール樹脂およびゴムなどに架橋反応を生じさせて、制動特性の向上をはかった。

(研究成果)

$\gamma$ 線照射量は  $1 \times 10^6$ ,  $5 \times 10^6$ ,  $1 \times 10^7$ ,  $5 \times 10^7$ ,  $1 \times 10^8$ r の5段階としたが、照射量の多いものほど硬度が高くなり、 $1 \times 10^8$ r の場合約30%増加した。半面、鋳鉄材との摩耗時には、騒音が大きくなり、2kc および7kc 付近にピークがみられた。摩耗量については、目下、計測中である。

## 8. 放射性物質の陸上輸送の安全対策に関する研究

海老原慎一郎

(研究経過)

放射性物質の輸送が法規にしたがって安全に行なわれているかどうかの実態調査を行なった。調査項目は放射性物質運搬容器や包装の良否、漏洩放射線量の多少、運搬者の被曝線量の測定、運搬車両における積載状況および運搬状況などである。調査対象物質は、コバルト60、セシウム137、プロメシム147、クリプトン85、水素3等で、調査地域は、九州日南地区から東北仙台地区におよんだ。調査方法は、自動車輸送に対しては追跡の方法で、鉄道輸送の場合は到着地で待ち受けて調査した。

また、容器および外装の強度について、取り扱い中

に誤って落した場合に安全であるかどうか検討するため、落下試験を行なった。試験対象として、JISによるガンマ線用のE型、B型、D型の3種を選び2mの高さから、砂、木、コンクリートの3種の床にそれぞれ垂直、横、逆向きに落下せしめ、その加速度、没入量、歪、変型などを計測した。

(研究成果)

- a) 運搬状況は、全般的に良好な状況で行なわれているが、次のような点が明らかとなった。
- 1) 一部法定速度を超過する場合や見張員がいなかったり、停車時の縄張りがあまり行なわれなかった。
  - 2) 積付状態の完全でないもの、積荷の移動したものが若干あった。
  - 3) 標識については総体的に取扱者の間で評判がよくない。特に標識の大きさ、取付位置、色および夜間の照明などについて検討を要する。
  - 4) 容器の包装、標札については良好で、被曝線量も問題がなかった。
  - 5) 車両の故障が起きたが、車両整備には万全を期すべきだと考える。
  - 6) 運搬従事者は放射性物質運搬上の法的知識がほ

とんどないのが目立った。

- 7) 貨車輸送については大体良好であったが、上下方向に対する固定は考慮する必要がある。
- b) 強度試験の結果から次のことが明らかになった。
- 1) 落下による衝撃加速度は500gを超える値が見られた。
  - 2) E型の反発係数は砂の場合に大きく、木、コンクリートの場合に小さな値となり、B型反発係数は落下高さが、1.5mまでは増加するが2mではさほど増大しない。また、D型ではほとんど反発係数は見られなかった。
  - 3) 各容器とも2mの高さから落下させた場合の変型は非常に少なく、普通この程度の衝撃に対しては十分な強度を有するものと思われる。
  - 4) B型容器のフタのとめ金具と蝶ねじ部は、逆向き落下の際の弱点であり、木箱の構造も強化する必要がある。またD型容器の締付けボルトが緩まないように配慮を要する。これらの試験ならびに調査の実施にあつては、船研内に「放射性物質陸上輸送協同研究委員会」を特別に組織して推進をはかった。