スクープ冷却方式主復水器における 冷却水の流れの状態*

萩原 信幸** 佐々木定男**
小倉 理一*** 富永 博之***

The Stream Condition of Cooling Water
in a Scoop Cooling Type Main Condenser

By Nobuyuki Hagiwara, Sadao Sasaki,
Michihito Ogura, Hiroyuki Tominaga

Recently the damages in the tubes of heat exchanger of sea water cooling type have frequently been experienced and the damaged condition could be noticed either from corrosion and erosion on the inner surface of tubes or from pin holes in the tubes.

The damages are considered to have been caused directly from accumulation of marine growth such as sea shells on the inner surface of tubes and from suction of foreign stuff like mud or sand to the heat exchanger.

On the other hand, the unbalancing stream condition in tubes is considered to be the indirect cause of damage.

To investigate the cause, the tank experiment was carried out using a 1/10 scale model to confirm the effect of the unbalanced stream condition of cooling water in tubes and water chambers of main condenser and also in scoop pipe.

In consequence of the above test, we have found out the following:

Extent of unbalance of stream in tubes is rather small despite of some fluctuational pressure existing in cooling water inlet chamber of main condenser, however, the phenomenon of cavitation was found to occur around the outlet of inner surface on the tubes near upper part of tube nest located within main stream area when the cooling water velocity in tubes exceeds some limited speed point.

In the light of above experiment, we have confirmed that the excessive cooling water velocity could cause not only inlet-attack but also erosion occurring around the outlet of inner surface on tubes.

1. ま え が き

近年、船舶にとう載されている海水冷却式熱交換器の管板および管内面の腐食、管の破孔漏えい事故がひん発している。S.48年当社建造のタービン船“M”丸のスクープ冷却式主復水器においても、S.51年1月初旬に2本の管漏えい事故を起こし、引続いて3か月後に管内面腐食の大きいものが多数発見され508本をプラグし、更に4か月後に7,037本の管取換え工事を行った。管腐食は主復水器の船首側管渠部(AおよびB管渠部)に多量に発生し、管腐食状況は海洋生物の管内面付着による潰食がほとんどであった。また、スクープ管路より流入する冷却海水の主流に位置する管渠部(D管渠部)の管出口付近の管内面には流速過大により発生したと思えるエロ

図1 主復水器断面図および入口側水室内流れ

*原稿受付 昭和52年7月1日

昭和52年春季学術講演(昭和52年5月25日)

**正会員 佐世保重工(株)(佐世保市立神町)

***佐世保重工(株)(佐世保市立神町)

ージョンも認められた。この事より、主流域の冷却管内を流れる冷却水量は過大で、主流域をはずれた船首側管渠部の管内を流れる冷却水量は少なく、海洋生物の生息上よい場所となる等、主復水器管内を流れる冷却水量の不均一が本事故に係るのではないかとと思われる。

したがって、本事故の原因究明の一手段として、S-51年5月にスクープ管路および主復水器の模型を製作し、船型性能試験用回流水槽内で、スクープ管路および主復水器内を流れる冷却水の流れパターンの実験を行い、ここに結果を得たので発表する。

2. 模型実験で適用した流速

スクープ管路および主復水器の水室ならびに冷却管内を流れる冷却水の流れパターン、圧力分布および流速分布調査、といったこの種の模型実験では、レイノルズ数を実物と模型の両方を一致させる事は困難である。一般に臨界レイノルズ数(2.5×10^3)以上であればレイノルズ数の影響は大差なく、無視出来ると言われている。

したがって、試験設備および計測精度を考慮して、実物主復水器およびスクープ管路の $\frac{1}{10}$ 模型を製作し、実験装置の関係より下記の管内流速3種につき実験を行った。

試験番号	I	II	III
主復水器冷却管内流速 (v_m m/s)	0.53	0.72	0.90
スクープ管路内流速 (u_m m/s)	0.37	0.50	0.62

3. 実船とう載の主復水器およびスクープ要目

主復水器		スクープ管	
冷却面積	2,500m ²	海水船底取入れ角度	30°-00'
冷却水量	10,500m ³ /h	復水器平面入口角度	21°-36'
管内流速	1.5m/s	復水器側面入口角度	9°-31'
折流数	1	管内径	1,400mm
管板間距離	4,400mm	船体出口リップ高さ	700mm
冷却管寸法	19φO.D×1.2×4470mm		
冷却管本数	9520(管渠群每本数は模型要目参照)		
冷却管材質	BsTF-2		

4. 供試模型

本模型は、スクープ入口部、スクープ入口部より主復水器冷却水入口側水室に至るスクープ管、主復水器冷却水入口側水室、主復水器冷却水出入口管板および冷却管渠群、圧力損失調整部、主復水器冷却水出口側水室より構成され、主復水器冷却水入口側および出口側水室の上には水室内部の冷却水流れ状態を観察出来るように透明のプラスチック製窓を設けている。

模型の図面を図2に示す。全体写真を写真1に示す。また、圧力調整部は6mmφのオリフィス群よりなり、管内流速をもとめる代表的な48本については、オリフィス入口および出口冷却管のそれぞれ中央に1.2mmφの静圧孔を

設けている。

4.1 主復水器模型要目

- 1) 模型寸法： $\frac{1}{10}$ 、但し2)~7)を除く。
- 2) 冷却管寸法：10mmφO.D×1.4mmt×110mmL
- 3) 管板間距離：104.5mm
- 4) 冷却管材質：Cup(銅管)
- 5) 冷却管本数：262本
- 6) 冷却管配列：管配列ピッチ寸法は16.87mmとし、管配列は下記による。

管渠群 No.	実物冷却管 (19mmφ×1.2mm) 本数	管本数 百分率 (%)	模型冷却管 (10mmφ×1.4mm) 本数	静圧計測 管本数
A	2803	29.4	77	14
B	940	9.9	26	5
C	1017	10.7	28	5
D	2803	29.4	77	14
E	940	9.9	26	5
F	1017	10.7	28	5
合計	9520	100.0	262	48

- 7) 圧力調整部オリフィス径：6mmφ(冷却管262本に装備)
- 8) 冷却水出入口室付冷却水管内径：140mm

4.2 スクープ要目

- 1) 模型寸法： $\frac{1}{10}$ 、但し、角度はすべて実船スクープと同一とし、模型は主復水器冷却水出口側水室付出口冷却管ノズルまでとし、リップは製作せず。
- 2) スクープ管内径：140mm

5. 模型実験装置および方法

図2に示すごとく、船型性能試験用回流水槽(1.5m幅×1.8m深サ×7.5m長サ)の中に主復水器およびスクープ管路の $\frac{1}{10}$ 模型を水没の状態を設置し、回流水槽内循環水ポンプ(7,000m³/h)を使用して、回流水槽内の水流速度を常時0.56m/sになるように整定させ、水槽内の水を循環回流させる。これにより水槽内の水はスクープ管路を経て主復水器内へ流入し、通過する。必要な水量をスクープ管路および主復水器内へ流して所要管内流速を得るために、更に主復水器の冷却水出口管の中途に空気駆動式水ポンプを設置し、吸込み吐出させる。所要水量および管内流速の設定は、主復水器冷却水出口管途上に装備した翼車形流速計(小野測器社製RM-503)の読みにより、上記空気駆動式水ポンプ付の空気供給弁を操作調整し、同ポンプの回転数を変化制御して得られる。

この方法で模型主復水器の冷却管内流速0.53m/s、0.72m/sおよび0.90m/sの三種について次の実験を行った。

5.1 スクープ管路内流速分布 スクープ管路(内径140mm、図2のイ点)の水流方向に対し直角面にJIS形ビーター管を設置し、スクープ管路内の流速分布(13点)を計測した。ビーター管で検出された流速相当の動圧は、

図2 主復水器およびスクープ模型実験装置図

写真 1

東洋ボルドウィン社製高感度圧力変換器(DLPU-002)にて電気信号値に変換され、更に、これは共和電業社製圧力計アンプ(DPM-6T)により増幅され、渡辺測器社製ペンレコーダー(MC-641)にて記録計測を行った。

5.2 主復水器冷却水入口側水室内流速分布測定

図2に示すように、管板の前方40mmの面に6mm球形5孔ピトー管(理化精機社製)を設置し、45点の流速および流向を計測した。ピトー管で検出された流速相

当の動圧は、スクープ管路内流速計測に用いた同一の計測器を使用して流速および流向の記録計測を行った。

5.3 主復水器冷却管内静圧および管内流速分布測定

(1) 静圧測定 模型主復水器冷却管262本中主な48本について、6mmφオリフィス板前後の静圧をそれぞれ冷却管の中央部で測定した。検出端は冷却管中央部に1.2mmφの静圧孔を設けており、測定静圧はビニール細管(外径2mmφ、内径1mmφ)を介してスキャンバルブ社製多点圧力計スキャナー(48JQGM-1)に導かれ、更にエントランスデバイス社製小形圧力変換器(EPA-125E-5W)にて電気信号値に変換し、渡辺測器社製多点ペンレコーダー(前述)にて記録測定を行った。

(2) 管内流速分布 上記(1)より得た6mmφオリフィス板前後の管内静圧測定値より管内流速を算出した。また、模型主復水器冷却管内の各平均流速値(0.53m/s、0.72m/sおよび0.90m/s)に対する各冷却管(48本)内の流速比を算出し、各冷却管内流速の不均一性の解析を行った。

5.4 主復水器冷却水出入口水室内の冷却水流れ

状態可視調査 主復器模型の冷却水入口側水室および出口側水室の上部にそれぞれ設けた観測窓より下記手法を用いて冷却水の流れパターンを調査した。

- イ. 水室管板上の3平面内にそれぞれ3色のタフトを取付けて冷却水の流れパターン観測.
- ロ. 液体発光粒子の追跡による冷却水の流れパターン観測.
- ハ. 水室に設けた細管より注出する染料による冷却水の流れパターン観測.

**6. スクープおよび主復水器
模型試験結果の考察**

スクープ管路内の流れを水の流速分布, 主復水器冷却水出入口水室内を流れる水の流れ状態, 流速分布および主復水器冷管内を流れる水の流速分布を調査, 解析の結果, 次のことが明確となった。

6.1 スクープ管路内の流速分布 計測の結果は, 図3に示すとおりで, これは実船の海上公試運転時における計測結果と比較してほぼ同一の流速分布傾向を示している。

6.2 主復水器冷却水入口側水室内の冷却水流れ状態

(1) スクープ管路より主復水器冷却水入口側水室に流れ込む主流は, 図1に示すごとく, 入口側水室内においては, 主復水器船尾側上部の管束部(D管束部)の中央に向かって流れる傾向を示す主流域があり, この流れは管板直前で分流し, 各冷却管へ流れ込む。

(2) 主復水器冷却水入口側水室内の冷却水流れパターンは, 図1に示すごとく, 一部に乱動領域を有する流れがあり, 主に主復水器船首側上部管束部(A管束部)および主復水器船首側下部管束部(B管束部)の管板前方は渦巻いた乱動域を形成する。また, この流れパターンは冷却水量を増減しても大きな変化はない。

(3) 主復水器冷却水入口側水室内の主流域の冷却水流

写真 2

図3 スクープ管内流速分布

図4 冷却水入口側水室内流速分布

(注) v_m : 模型冷却管内流速, 図中の数字は水柱値

(注) v_m : 模型冷却管内流速, 図中の数字は水柱値

(注) v_m : 模型冷却管内流速, 図中の数字は水柱値

(注) v_m : 模型冷却管内流速, 図中の数字は水柱値

図5 冷却管内入口側圧力分布

図6 冷却管内出口側圧力分布

図7 主復水器冷却管出口側静圧変動記録
(管内流速 0.90 m/s)

速は乱動域の流速より速く、主流域内の冷却水中に含まれる小さな気泡は水室内で抜け難く、冷却管内に流入する傾向をもつ。

(4) スクープ管路内を通過して主復水器冷却水入口側水室に流入する冷却水に混入する異物は、その比重により漂着する場所が異なる、すなわち、比重の大きい物質は主としてB管束部下方付近に、比重の小さい物質はA管束部上方付近に漂着する傾向がある。

(5) 主復水器冷却水入口側水室内の冷却水流速分布は、図4に示すごとく、管内流速0.53 m/sの場合には船首～船尾方向にわたり均一した流速範囲をもつ流れパター

図9 管内流速不均一性

ンであるが、管内流速が0.72 m/s、0.90 m/sと増大するにつれ均一流速範囲は上下方向に細長くなる流れパターンとなる傾向をもつ。

6.3 主復水器冷却管内静圧および管内流速分布

(1) 主復水器冷却管内オリフィス入口側圧力分布

管内流速0.53 m/sの場合には圧力の差はほとんどなく、均一であるが、管内流速が0.72 m/s、0.90 m/sと増大するにつれ圧力の不均一度は増大する(図5参照)。

(2) 主復水器冷却管内オリフィス出口側圧力分布

管内流速0.53 m/sの場合には圧力の差はほとんどなく、均一であるが、管内流速が0.72 m/s、0.90 m/sと増大するにつれ圧力の不均一度は増大する(図6参照)。

特に管内流速が0.90 m/sの場合には、図7に示すごとく、主流域の上方に位置するDおよびA管束部上方の冷却管出口側では大きな圧力変動が発生する。

(3) 主復水器冷却管内流速 上記(1)、(2)により各冷却管(計測管)の管内流速を算出し、平均管内流速値に対する各計測管の管内流速比を求めたものを図8に示す。この結果より、主復水器冷却水入口側水室内では主流域の外に乱動域が一部存在するにもかかわらず冷却管内の流速不均一度は小さく、ほぼ均一に冷却水は管内を流れていることを示している。すなわち、図9に示すごとく、管内流速が0.53 m/sのとき不均一度は±6.0%、0.72 m/sのとき±8.6%、0.90 m/sのとき±10.4%である。但し、管内流速0.90 m/sの場合にはDおよびA管束部上方の冷却管出口で大きな圧力変動が発生するため、この部分での管内流速も大きく変動する。

7. 主復水器冷却水出入口側水室内の流れ状態

主復水器冷却水出口側水室における冷却水の流れ状態として、タフトによるものを写真3、染料によるものを写真4に参考として示す。

8. ま と め

今回の実験結果により、主復水器冷却水入口側水室内

(注) v_m : 模型冷却管内流速
図中の数字は各冷却管内流速と平均冷却管内流速との比

(注) v_m : 模型冷却管内流速
図中の数字は各冷却管内流速と平均冷却管内流速との比

(注) v_m : 模型冷却管内流速
図中の数字は各冷却管内流速と平均冷却管内流速との比

図8 冷却管内流速比分布

写真 3

写真 4

は冷却水量の多少にかかわらず乱動領域を有するが、冷却管内を流れる冷却水の流速(すなわち、流量)の不均一度は $0.47 \sim 0.63 \text{ m/s}$ で $\pm 6.4 \sim 8.0\%$ と小さい。更にスクープ管路より主復水器冷却水々室内に流入する冷却水の主流域にあたるDおよびA管巢部上方に位置する冷却管は、冷却管内流速 0.90 m/s の場合には管出口付近管内面で乱動が発生するが、 0.72 m/s 以下の場合には発生しない。すなわち、一般に冷却水流量(流速)過大の場合には管板および管入口部においてインレットアタックを発生すると言われているが、更に管内流速がある限界値を越えた場合には、主流域に位置する冷却管は、冷却水中に含まれる微小気泡の影響により管出口付近の管内面でキャビテーション現象を発生することが判明した訳で、管出口付近の管内面にエロージョン発生の可能性が

裏付けられた。

したがって、本船主復水器D管巢部冷却管の管出口付近に発生したエロージョンの原因は、海洋生物および泥土によるAおよびB管巢部の管内閉そく、海洋生物の管内面付着による潰食発生および管漏えい事故発達に伴う管508本の木栓施行により、D管巢部の冷却管内流速が限界値を越えた事によると思われ、主流域のA管巢部上方管にエロージョンの発生がなかったのは該部管が泥土により閉そくされていた事が幸いしたものと思われる。

9. あとがき

今回の模型実験においては、試験設備の関係より1/10模型を用いて行ったが、実物との相関についてはいろいろ問題があり定量的な結論付が出来ず定性的な結論となった。しかし、定性的とは言え、冷却管内を流れる冷却水の流量不均一度は冷却水量の増減にかかわらず極めて小さい事、および管内流速がある限界値を越えると主流域の範囲内に位置する冷却管は冷却管内出口付近でキャビテーション現象が発生する事が判明した。今回の模型実験結果の裏付としては、実船における実験確認以外に方法はないが、実船における究明実施については今後機会があったら行いたい。なお、今回の主復水器冷却管々内面腐食の原因として、多量の海洋生物の管内面付着および管内閉そくが主要因であり、この対策としては、海洋生物付着防止装置(次亜塩素酸発生装置、たとえば大機工業製ハイクロレーター、三菱重工製MGPS等)の設備使用が望まれる。本船の場合もMGPSを設置し、管内面に防食保護被膜をつくる目的で硫酸第一鉄の投入を併用した事で、その後、主復水器冷却水室はもちろん、冷却管内面に海洋生物の付着は全くなり、管内面には硫酸第一鉄の管保護被膜が十分形成されており、なんら問題の発生は起きていない。

文 献

- 1) 山田, "コンデンサースクープに関する研究", 機械の研究, 9巻, 12号(1957), 27
- 2) J. R. WESKE, "Investigation of The Action of Condenser Scoop Based upon Model Tests", Journal of A.S.N.E., May, 1939, 191.