JAEA-Technology 2018-009 DOI:10.11484/jaea-technology-2018-009



ロボット試験用水槽の昇温試験

Heating Test of Robot Test Pool

荒川 了紀 野崎 信久 平田 雄二 Ryoki ARAKAWA, Nobuhisa NOSAKI and Yuji HIRATA

> 福島研究開発部門 福島研究開発拠点 楢葉遠隔技術開発センター モックアップ試験施設部

Demonstration Test Department Naraha Center for Remote Control Technology Development Fukushima Research Institute Sector of Fukushima Research and Development

January 2019

日本原子力研究開発機構

Junuary 2013

Japan Atomic Energy Agency

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。 なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(<u>https://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地4 電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency. Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Institutional Repository Section,

Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department, Japan Atomic Energy Agency.

2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2019

JAEA-Technology 2018-009

ロボット試験用水槽の昇温試験

日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門 福島研究開発拠点 楢葉遠隔技術開発センター モックアップ試験施設部 荒川 了紀、野崎 信久、平田 雄二*

(2018年8月7日受理)

楢葉遠隔技術開発センターは、試験棟と研究管理棟から構成され、東京電力ホールディングス 福島第一原子力発電所(1F)の事故後の廃炉作業に向けて必要となる各種試験設備が設置されて いる。試験設備のうち、水中ロボットの試験用水槽は、室温から 60℃まで昇温させた温度条件下 で試験が可能な設備となっている。そこで、設置した試験用水槽を昇温させた場合の水槽内の温 度分布及び温度上昇挙動を把握することを目的に、室温から 60℃(最高設定温度)まで昇温させ る昇温試験を行うとともに、解析的検討を行った。

本報告は、その昇温試験で得られた実測結果と解析による比較検討結果をまとめたものである。

楢葉遠隔技術開発センター:〒979-0513 福島県双葉郡楢葉町大字山田岡字仲丸 1-22 * 原子力エンジニアリング株式会社

JAEA-Technology 2018-009

Heating Test of Robot Test Pool

Ryoki ARAKAWA, Nobuhisa NOSAKI and Yuji HIRATA*

Demonstration Test Department Naraha Center for Remote Control Technology Development Fukushima Research Institute Sector of Fukushima Research and Development Japan Atomic Energy Agency Naraha-machi, Futaba-gun, Fukushima-ken (Received August 7, 2018)

The Naraha Center for Remote Control Technology Development consists of a mock-up test building and a research management building, and various test facilities are installed in them for the decommissioning work after the accident of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Tokyo Electric Power Company Holdings.

In the test facilities, the robot test pool for the underwater robot can be tested under temperature conditions raised from room temperature to 60°C. Then, for the purpose of understanding the temperature distribution inside of the pool and the temperature rising behavior, a temperature heating test with room temperature to 60°C (maximum setting temperature) was performed, and as well as an analytical study was performed.

This report summarizes the obtained both experimental and analytical studies.

Keywords: Temperature Behavior, Heating Test, Temperature Analysis, Under Water Robot, Robot Test Pool, Naraha R&D Center, JAEA

^{*} Nuclear Engineering Co., Ltd.

目次

1. はじめに	1
2. 昇温試験	2
2.1 計測機器	2
2.1.1 付帯温度計	2
2.1.2 熱電対	2
2.2 計測方法	2
2.3 計測結果	2
3. 解析評価	7
3.1 解析モデル	7
3.1.1 入熱量の評価	7
3.1.2 放熱量の評価	7
3.1.3 水槽温度の評価	0
3.2 解析条件 1	1
3.3 解析結果	2
4. 考察	2
4.1 実測結果に関する考察 22	2
4.2 解析結果に関する考察 22	2
5. まとめ	7
謝辞	8
参考文献	8

Contents

1. Introduction	1
2. Heating Test	2
2.1 Measuring Equipment	2
2.1.1 Thermometers	2
2.1.2 Thermocouples	2
2.2 Measuring Methods	2
2.3 Measuring Results	2
3. Analysis	7
3.1 Analytical Model	7
3.1.1 Estimation of Heat Input	7
3.1.2 Estimation of Heat Dissipation	7
3.1.3 Estimation of Temperature	10
3.2 Analytical Condition	11
3.3 Analytical Results	12
4. Discussion	22
4.1 Experiment	22
4.2 Analysis	22
5. Summary	27
Acknowledgements	28
References	28

1. はじめに

楢葉遠隔技術開発センターは、試験棟と研究管理棟から構成され、東京電力ホールディングス 福島第一原子力発電所(以下、「1F」)の事故後の廃炉作業に向けて必要となる各種試験設備が 設置され、民間企業や研究開発機関、大学などによる様々な施設利用が進められている。

事故の起きた 1F には、原子炉建屋下部など水没している箇所が存在し、そこでは水中ロボット が必要である。試験棟に設置されたロボット試験用水槽(以下、「水槽」)は、作業フロア及び水 槽等から構成された全高 8.5m、縦横約 8m の大きさのエリア内で、直径 4.5m、水深 5m の水槽を 使って様々な試験が実施できる。水質については、上水、工業用水、濁水等に変更可能である。 さらに、ボイラによって熱せられた温水を循環させることにより、水温を最高 60℃まで任意の温 度に調節できる。また、地上階部分と中 2 階部分の周囲に観察窓が合計 12 箇所設置されており、 試験時のロボットの動きを様々な角度から確認することができる(図1)。

この水槽を昇温させた場合の水槽内の温度分布及び温度上昇挙動を把握するために、室温から 60℃(最高設定温度)まで昇温させ、その過程について熱電対により温度分布を計測した。さら に、温度挙動を支配する伝熱モードを明らかとするため、解析的検討を行った。



図1 ロボット試験用水槽 試験用水槽は、内径4.5m、水深5mで上水、工業用水、濁水、 塩水を用いて、室温~60℃までの温度域で試験が可能である。

2. 昇温試験

2.1 計測機器

図 2.1-1 に昇温させるボイラにつながる配管の配置を示す。床面から 500mm の高さにボイラからの温水入口があり、2060mm と 4600mm のそれぞれの高さに水槽からボイラに出ていく配管の温水出口①及び②がある。水槽内の水は、ポンプによってこれらの配管を通り循環され昇温される。なお、温水出口②については、水槽上部から見て 5°ずれた周方向位置となっている。図に記した番号は、熱電対の設置位置である。

2.1.1 付帯温度計

水槽には2つの位置に温度計が設置されている(図2.1-2)。1つは水槽南側に、床上から600mmの位置にある TI-1で、水槽内部に突出している。もう一方は循環配管内に TIC-2 が設置されている。

2.1.2 熱電対

本試験で使用した熱電対を以下に示す。

- ・タイプK SUS316
- ・シース外径 1.0mm
- ・シース長 500mm、1500mm、2500mm、3500mm、4500mmの各 8本(計 40 本)

上に示した 1500~5500mm の熱電対を PE ロープに SUS ワイヤ (φ0.3mm) で1本ずつ束ね 8 セ ット用意した (図 2.1-3)。これらをデータロガー (GRAPHTEC 製 GL7000) に接続し、計測を行 った。

2.2 計測方法

主な計測条件を表 2-1 に示す。熱電対の設置位置は、図 2.1-1 の平面図に示す①~⑧の 8 箇所で ある。具体的には、温水の出入口に近接する位置を①とし、反時計回りの順番とし、外側に 4 箇 所、内側に 4 箇所の計 8 箇所である。この設置位置とシース長に準じて、例えば「設置位置①の シース長 1500mm」の場合は「1-1500」と番号を付して記載する。設置高さについては、床面を基 準とし、床面に最も近い熱電対を 500、水面に近い熱電対を 4500 とした。試験では、水槽の温度 が 60℃になるまで全熱電対 40 点の計測を実施した。

また、熱電対の他、水槽付属の2つの温度計 TI-1と TIC-2の温度も併せて1時間毎に計測した。

2.3 計測結果

表 2-2 は、全熱電対(40点)が60℃に到達した時刻の温度データをまとめたものである。表の 左端は記録開始からの経過時間(分)で、その右が記録時刻である。左から熱電対1-500~8-4500 の温度変化を示しており、橙色で着色した値が60℃以上の温度である。また、赤枠部分が各熱電 対で60℃に初めて到達した点である。昇温から約22時間(1315分)経過した時、熱電対1-500が 60℃に到達した。その3時間後には残り全ての熱電対が60℃に到達した。

図 2.3-1 は、全ての熱電対(40 点)の温度変化を示したもので、昇温を終了してから 24 時間後

までのデータをプロットしている。1-500 地点の温度変化を除けば、設置位置と水深の違いによる 温度上昇に差はなく、1 時間に約 1.5℃の上昇であった。また、60℃昇温させるまでに 25 時間程 度の時間を要した。今回は試験棟内の温度が 24.7℃、水温が約 20℃であった。温度の低くなる冬 季では、さらに昇温時間を要することが考えられる。昇温を終了させてからは、水槽温度は全体 的に低下を示すが、その温度低下は 24 時間あたり 3℃程度で、常温に戻すには 1 週間程度要する ことが見込まれる。

	-X -									
試験棟 室温		24.7%								
(計測開始時)	(計測開始時) 24.7°C									
* # 古 対 哲 泊 再	TI-1	19.9℃								
小帽的初期温度	TIC-2	21.7°C								
データロガー設定	5 分間に 1 回間隔で記録									
入熱温度	65°C→	75℃(切り替えは試験開始後 400 分)								
タンク温度	マンク温度 60℃まで昇温									

表 2-1 主な計測条件

_																																										
	4500	57.8	57.8	57.8	57.9	58	58	58.1	58.2	58.2	58.3	58.2	58.3	58.5	58.5	58.6	58.6	58.8	58.7	58.8	58.9	58.8	59	59.1	59.1	59.1	59.2	59.4	59.3	59.4	59.4	59.6	59.6	59.6	59.7	59.8	59.7	59.8	59.8	59.8	60	60
	3500	57.8	58	58	58	58.1	58.3	58.3	58.3	58.4	58.4	58.4	58.5	58.7	58.7	58.8	58.8	58.9	58.9	58.9	59.1	59.1	59.1	59.2	59.4	59.3	59.3	59.5	59.5	59.5	59.5	59.7	59.7	59.7	59.8	59.9	59.9	60	60	60	60.1	60.1
~	200	57.9	58	58.1	58.3	58.3	58.2	58.3	58.4	58.4	58.5	58.4	58.6	58.8	58.8	58.9	58.9	59	59	59.1	59.1	59.2	59.1	59.3	59.4	59.4	59.6	59.6	59.5	59.7	59.6	59.8	59.8	59.8	59.9	60	60	99	<u> 60.1</u>	30.1	60.3	<u> 60.2</u>
	00 2	7.9	7.9	8.1	8.2	8.3	8.6	8.3	8.4	8.4	8.5	8.5	8.6	8.7	8.8	8.9	8.9	59	8.9	59	9.1	9.2	9.1	9.2	9.4	9.4	9.4	9.5	9.5	9.6	9.7	9.8	9.7	9.8	9.8	60	60	60	0.1	0.1	0.2	0.2
	0 15	7.7 5	7.8 5	7.8 5	58 5	58 5	8.1 5	8.3 5	8.2 5	8.2 5	8.3 5	8.4 5	8.4 5	3.6 5	8.5 5	8.6 5	8.8	8.9	8.9 5	8.9	9.1 5	59 5	59 5	9.1 5	9.2 5	9.2 5	9.3 5	9.4 5	9.4 5	9.4 5	9.4 5	9.7 5	9.7 5	9.7 5	9.7 5	9.8	9.8	9.9	60 6	9.9 6	0.1	60 6
	0 50	.8	.8	1 5	1.1	.2	3 5	.4 5	.4 5	.4 5	.4 5	22	.6 5	8.	.7 5	6	6.0	1.5	6.0	1 5	1 5	1	1.	.2 5	4 5	5 5	5	.5	.6 5	9.	9.0	.8	.8	.8	50 5	.9	30 5!	.1 5	1.2	11 55	.3 61	
	0 450	5 57	5 57	.1 58	.2 58	.2 58	.3 58	4 58	.4 58	.4 58	.4 58	.5 58	.6 58	.8 58	.8	.8	.9 58	.1 59	.9 58	.1 59	.1 59	.2 59	.1 59	.3 59	.4 55	.4 55	.4 55	.6 55	.5 59	.6 59	.7 59	.8	.8 55	.9 50	œ.	30 55	00	00 00	.1 60	.1 60	.2 60	.3 60
	350	8	8	1 58	3 58	3 58	3 58	5 58	5 58	5 58	6 58	5 58	7 58	9 58	9 58	9 58	9 58	1 59	1 58	2 59	2 59	2 59	2 59	4 59	5 59	4 59	5 59	7 59	7 59	7 59	8 59	9 59	9 59	9 59	9 59	1	9 0	-	3 60	2 60	3 60	3 60
٢	250(6	1 5	8 58.	3 58.	1 58.	1 58.	4 58.	58.	7 58.	6 58.	5 58.	9 58.	7 58.	9 58.	9 58.	9 58.	9 59.	9 59.	9 59.	1 59.	1 59.	2 59.	2 59.	4 59.	7 59.	4 59.	59.	8 59.	0 59.	6 59.	8 59.	1 59.	8 59.	9 59.	9 60.	9 0	09 (1 60.	1 60	3 60.	3 60.
	1500	9 57.	9 58.	8 5	1 58.	8 58.	1 58.	2 58.	3 58.	3 58.	3 58.	5 58.	5 5	58.	7 58.	58.	58.	1 58.	9 58.	1 58.	2 59.	9 59.	1 59.	2 59.	3 59.	2 59.	3 59.	7 59.	8 59.	9	5 59.	7 59.	7 60.	7 59.	9 59.	59.	9	9	1 60.	09 00.	1 60.	09 00.
	500	7 57.	8 57.	5	8 58.	2	I 58.	3 58.	3 58.	4 58.	4 58.	58.	5 58.	58.	58.	7 58.	58.	9 59.	58.	9 59.	9 59.	6	I 59.	2 59.	2 59.	3 59.	2 59.	1 59.	5 59.	3 59.	5 59.	7 59.	7 59.	7 59.	7 59.	9 (59.	3 59.	09 00.	9 0	09 00.	9
	4500	57.	5	57.3	5	58.	58.	1 58.	1 58.	1 58.	58.	58.6	58.	7 58.6	58.6	58.	58.6	58.	26	58.	58.	5	59.	59.2	59.2	1 59.	1 59.2	59.4	59.	59.	1 59.5	59.	59.	59.	59.)9 ((59.9	59.8	9 (9	99	.09
	3500	57.9	58	57.9	58	58.3	58.3	58.4	58.4	58.4	58.6	58.6	58.7	58.7	58.8	58.8	58.9	56	59.1	59.1	59.1	59.2	59.2	59.2	59.3	59.4	59.4	59.6	59.6	59.5	59.7	59.7	59.8	59.8	59.8	90	90	90	90	60.1	60.2	60.2
9	2500	58	58.1	58	58.1	58.3	58.3	58.4	58.5	58.5	58.6	58.7	58.9	58.8	58.8	58.9	29	59.1	59.1	59.2	59.2	59.2	59.4	59.4	59.4	59.5	59.5	59.6	59.7	59.6	59.8	59.8	09	09	59.9	60.1	60.1	60.1	60.1	60.2	60.3	60.3
	1500	58	58.1	58	58.2	58.3	58.4	58.4	58.4	58.5	58.6	58.6	58.8	58.8	58.8	58.9	58.9	59.1	59.1	59.2	59.2	59.2	59.4	59.4	59.4	59.5	59.5	59.6	59.7	59.7	59.8	59.8	59.9	59.9	60	60.1	60.1	60.1	60.1	60.3	60.3	60.3
	500	58	58	58	58	58.1	58.2	58.3	58.3	58.3	58.5	58.6	58.6	58.6	58.7	58.8	58.9	58.9	59	59.1	59.1	59.3	59.2	59.2	59.3	59.4	59.3	59.5	59.5	59.8	59.7	59.7	59.8	59.9	59.8	60	60.1	60.1	60.1	60.1	60.2	60.3
	4500	58	58.1	58.1	58.2	58.3	58.3	58.4	58.5	58.5	58.6	58.6	58.8	58.8	58.8	58.8	29	59.1	59.1	59.1	59.1	59.2	59.3	59.3	59.4	59.5	59.5	59.5	59.7	59.7	59.8	59.8	59.9	59.9	60	09	60.1	60.2	60.1	60.1	60.3	60.3
	3500	57.9	58	58	58	58.1	58.3	58.3	58.3	58.4	58.6	58.6	58.8	58.8	58.8	58.8	59	59.1	59	59.1	59	59.1	59.2	59.3	59.4	59.4	59.4	59.5	59.6	59.6	59.7	59.7	59.9	59.8	59.8	60.1	60	60.1	60.2	60.2	60.2	60.2
2	2500	58	58	58	58.1	58.3	58.3	58.3	58.4	58.6	58.5	58.6	58.8	58.8	58.8	58.8	59	59	59	59.1	59.1	59.2	59.3	59.4	59.4	59.4	59.4	59.6	59.7	59.7	59.7	59.8	60	59.9	60	60.1	60.1	60.1	60.2	60.2	60.3	60.3
	1500	58	58	58	58	58.2	58.2	58.3	58.4	58.4	58.6	58.6	58.7	58.8	58.8	58.8	58.9	59	59	59.1	59.1	59.1	59.2	59.3	59.4	59.4	59.4	59.5	59.6	59.5	59.7	59.7	59.8	59.8	59.8	60	60	60	60.1	60.2	60.2	60.2
	500	58	58.1	58	58.1	58.3	58.3	58.4	58.4	58.4	58.6	58.6	58.8	58.8	58.8	58.8	58.9	59.1	59.1	59.2	59.1	59.2	59.3	59.4	59.4	59.4	59.5	59.6	59.6	59.5	59.8	59.8	59.9	59.9	59.8	60.1	60.1	60	60.1	60.2	60.2	60.3
	4500	57.8	57.9	58	58.1	58.1	58.3	58.3	58.4	58.5	58.3	58.5	58.5	58.7	58.8	58.8	58.9	58.9	58.9	59	59.1	59.1	59.1	59.2	59.3	59.3	59.4	59.4	59.5	59.5	59.6	59.8	59.7	59.8	59.8	59.9	60	59.8	60	60.1	60.2	60.3
	3500	58	58.1	58.2	58.3	58.4	58.3	58.4	58.6	58.6	58.4	58.7	58.7	58.8	58.9	59	59.1	59.1	59.1	59.1	59.2	59.2	59.3	59.4	59.3	59.4	59.5	59.7	59.7	59.7	59.8	59.9	59.9	59.9	60	60.1	60.1	60.1	60.2	60.2	60.3	60.4
4	2500	58	58	58.1	58.1	58.2	58.2	58.3	58.4	58.4	58.5	58.5	58.6	58.6	58.8	58.9	59	58.9	59	59	59.1	59.3	59.3	59.4	59.3	59.3	59.4	59.5	59.5	59.6	59.7	59.8	59.8	59.8	59.9	60	60	60.1	60.1	60.1	60.2	60.4
	1500	57.8	58	58.1	58.1	58.3	58.3	58.4	58.4	58.4	58.4	58.5	58.6	58.8	58.8	58.9	59	59	58.9	59	59	59.2	59.3	59.2	59.3	59.4	59.3	59.4	59.5	59.6	59.7	59.7	59.7	59.7	59.9	59.9	60.1	60.1	60.1	60.1	60.2	60.3
	500	57.8	58	58.1	58.3	58.2	58.3	58.4	58.5	58.5	58.4	58.6	58.8	58.8	58.8	58.9	58.9	58.9	58.9	59	59.1	59.1	59.2	59.3	59.4	59.3	59.5	59.5	59.5	59.6	59.7	59.7	59.8	59.8	59.9	59.9	60	60.1	60.1	60.1	60.1	60.3
	4500	58	58.1	58.2	58.3	58.4	58.4	58.6	58.7	58.5	58.4	58.7	58.8	59.1	58.9	59.2	59	59	59	59.2	59.3	59.3	59.4	59.4	59.4	59.3	59.5	59.6	59.5	59.6	59.9	59.9	59.9	60	60	60.1	60.2	60.1	60.3	60.2	60.3	60.4
	3500	58.1	58.1	58.2	58.3	58.4	58.4	58.6	58.6	58.6	58.9	58.7	58.8	58.8	59	59.1	59.1	59.2	59	59.1	59.4	59.2	59.4	59.6	59.5	59.4	59.6	59.5	59.6	59.7	59.7	59.8	59.8	59.9	60	60.1	60.1	60.1	60.4	60.2	60.3	60.3
3	2500	58.1	58.1	58.2	58.3	58.6	58.5	58.6	58.5	58.8	58.8	58.8	58.6	59.1	59	59.2	59.1	59	59.1	59.1	59.4	59.3	59.6	59.5	59.7	59.6	59.8	59.4	59.7	59.7	59.7	59.8	59.8	60	60	09	60.2	60.1	60.1	60.3	60.3	60.6
	1500	58	58	58.1	58.6	58.1	58.2	58.4	58.6	58.6	58.5	58.7	59	58.9	58.6	58.9	58.9	58.9	59.2	58.9	59.2	59.1	59.2	59.5	59.3	59.2	59.4	59.7	59.4	59.6	59.7	60.1	60	59.7	59.8	59.8	60	60	60	60.2	60.1	60.3
	500	57.7	58	58	58.1	58.3	58.3	58.3	58.4	58.4	58.3	58.6	58.8	58.7	58.7	58.8	58.9	58.8	59.1	59	59.1	59.2	59.2	59	59.2	59.3	59.4	59.5	59.5	59.6	59.5	59.7	59.8	59.8	59.8	60	60	09	60	60.1	60.1	60.2
	4500	57.7	57.9	57.9	57.9	58.1	58.1	58.3	58.3	58.3	58.3	58.5	58.6	58.7	58.7	58.9	58.7	58.9	58.8	59	59.2	59.1	59.1	59.2	59.2	59.4	59.4	59.7	59.6	59.6	59.4	59.7	59.7	59.8	59.7	59.8	59.9	59.9	60.1	60.1	60.1	60.2
	200	58	58.1	58	58.3	58.3	58.4	58.4	58.5	58.4	58.6	58.7	58.6	58.8	58.9	59	58.9	59	58.9	59.1	59.3	59.3	59.3	59.4	59.4	59.5	59.5	59.7	59.7	59.7	59.7	59.9	59.9	59.9	59.9	60	60.1	60.1	60.2	60.3	60.2	60.3
2	2500	58.1	58.1	58.1	58.3	58.2	58.4	58.4	58.5	58.6	58.5	58.6	58.8	58.8	58.9	59.1	58.9	59.1	59.1	59.2	59.4	59.4	59.4	59.4	59.5	59.6	59.5	59.7	59.7	59.7	59.8	59.9	59.8	60	60	60.1	60.1	60.3	60.3	60.3	60.4	60.4
	500 2	58	58.1	58.1	58.2	58.2	58.2	58.4	58.4	58.4	58.5	58.6	58.7	58.8	58.8	59.1	58.8	59.1	59	59.1	59.2	59.2	59.2	59.4	59.4	59.5	59.5	59.7	59.6	59.7	59.7	59.7	59.8	59.9	60	60	60.1	60.1	60.2	60.2	60.2	60.2
	500 1	57.7	57.9	58	58.1	58.1	58.2	58.3	58.4	58.3	58.4	58.6	58.6	58.6	58.7	58.9	58.8	58.9	58.8	58.9	59.1	59.1	59.1	59.2	59.2	59.4	59.4	59.5	59.5	59.6	59.5	59.7	59.7	59.7	59.8	59.9	60	60	60.1	60.1	60.1	60.1
	500	58	58	58.1	58.3	58.3	58.4	58.3	58.5	58.5	58.6	58.8	58.8	58.7	58.8	59.1	59	59	59.1	59.2	59.2	59.2	59.3	59.4	59.4	59.6	59.7	59.7	59.6	59.8	59.7	59.9	60	60	60	60	60.1	60.2	60.1	60.1	60.2	60.3
	500 4	58.1	58.1	58	58.2	58.4	58.4	58.4	58.5	58.5	58.6	58.8	58.8	58.8	58.8	59	59	59.1	59.1	59.1	59.2	59.3	59.3	59.4	59.5	59.7	59.5	59.7	59.6	59.7	59.7	59.8	59.8	59.9	59.9	60	60.1	<u>30.1</u>	60.1	<u> 50.2</u>	60.3	60.3
-	500 3	58	58.1	58.1	58.3	58.3	58.3	58.4	58.4	58.4	58.5	58.6	58.7	58.8	58.8	58.9	58.9	58.9	58.9	59.1	59.2	59.2	59.3	59.4	59.4	59.5	59.5	59.7	9.6	59.6	59.6	59.8	59.8	59.8	60	60	60	30.1	30.1	<u>30.1</u>	60.1	30.2
	500 1	58	58.1	58.1	58.3	58.1	58.3	58.3	58.5	58.5	58.5	58.7 5	58.8	58.8	58.8	59	38.8	59	59.1 5	59.1	59.2	59.2	59.3	59.4 5	59.4	59.5	59.5	59.7 5	59.7	59.7	59.8	59.8	59.8	59.8	60	60	30.1	30.1	30.1 (30.2	50.3	30.1
	00 15	58.5	30.6	30.3	3 8.8	59.2	59.2 E	19.8	909	58.7	39.6	31.2	3 9.6	59.5	59.5	59.5	19.8	59.7	1 6.61	9 09	90	60 5	59.4	30.3	30.5	30.3	3 6.0	30.2	3 8.00	30.8	30.7	31.7	31.2	3 6.0	32.2	\$1.4	31.6	9 6:00	61 (61 (61 (30.7 6
mes	19 11	3:47 5	3:47 6	3:47 6	3:47 5	3:47 5	3:47 5	3:47 5	3:47	3:47 5	3:47 5	3:47 6	3:47 5	3:47 5	3:47 5	3:47 5	3:47 5	3:47 5	3:47 5	3:47	3:47	3:47	3:47 5	3:47 6	3:47 6	3:47 6	3:47 6	3:47 6	3:47 6	3:47 6	3:47 6	3:47 6	3:47 6	3:47 6	3:47 6	3:47 6	3:47 6	3:47 6	3:47	3:47	3:47	3:47 6
	》時	0 6:58	5 7.05	30:7 0	5 7:15	0 7:15	5 7:25	0 7:28	5 7:35	0 7:36	5 7.43	0 7:48	5 7:53	0 7:58	5 8:0(30:8 0	5 8:13	0 8:15	5 8:25	0 8:26	5 8:3;	0 8:35	5 8:4:	0 8:46	5 8:5%	0 8:58	5 9:05	30:6 0	5 9:15	9:18	5 9:2:	0 9:2{	5 9:3(0 9:36	5 9:4:	0 9:46	5 9:55	0 9:56	5 10:05	0 10:08	5 10:1(0 10:15
经语	時間(分	131(131	132(132;	133(133	134(134	135(135	136	136	137(137;	138(138	139(139	140(140	141(141;	142(142;	143(143	144(144;	145	145	146	146;	147	147;	148(148;	149(149	150	150;	151

表 2-2 60℃到達時刻近傍の熱電対による温度測定結果



図 2.1-1 循環配管の水槽への接続位置と熱電対の設置位置



図 2.1-2 付帯温度計 (TI-1、TIC-2)の位置



図 2.1-3 熱電対





- 3. 解析評価
- 3.1 解析モデル

水槽の昇温試験に対する解析モデルを図 3.1-1 に示す。直径 4.5m の容器内に高さ 5m の水が入れられる構造で、高温水が入口配管を通して流入し出口配管から流出することにより、容器内温度が昇温される。

そこで、解析モデルとして下記を考慮する。

3.1.1 入熱量の評価

 T_{in} (\mathbb{C})の高温水が水温 T_w (\mathbb{C})のタンク内に毎秒 V_{in} (m^3/s)流入するとき、dt 時間当たりの入熱量 Q_{in} は、下式により計算できる。

$$Q_{in} = C_w(T_w) \times \Delta T \times V_{in} \times \rho(T_w) \times dt$$
(3-1)

ここで、C_w(T_w)は水の比熱(ただし、水温 T_wの関数)(J/(kg·K))、

∠T は温度差(℃)(=T_{in}-T_w)、

ρ(T_w)は水の密度(ただし、水温 T_wの関数)(kg/m³)

である。

3.1.2 放熱量の評価

タンクからの放熱量として、単位時間あたりの上部からの放熱量を Q_1 (W)、側部からの放熱量 $e Q_2$ (W)、下部からの放熱量 $e Q_3$ (W)とする。

(1) 上部からの放熱量 Q₁

上部からの放熱量 Q_1 は、上部保温材(ウレタン)から空気への放熱 Q_{10} (W)、水面より空気 への放熱 Q_{12} (W) 及び蒸発による放熱 Q_{13} (W) の 3 通りの熱流を考慮する。

i) 上部保温材(ウレタン)から空気への放熱

まず、上面からの伝熱による放熱 Q₁₀について評価する。タンク上部の水面には保温用として ウレタンが設置されているため、伝熱モードとして、図 3.1-2 に示す熱伝達及び熱伝導のモードを 考慮する。

水からウレタンへの熱伝達による熱流速 q_{wu} (W/m^2)、ウレタン中の熱伝導による熱流速 q_u (W/m^2)、ウレタンから空気への熱伝達による熱流速 q_{uA} (W/m^2)は、

$$q_{wu} = \alpha_{wu} \times (T_w - T_{u1})$$
(3-2)

$$q_{u} = (\lambda_{u}/d_{u}) \times (T_{u1} - T_{u2})$$
 (3-3)

$$q_{uA} = \alpha_{uA} \times (T_{u2} - T_A)$$
(3-4)

ここで、上部からの放熱による熱流速 $q1_{\mathbb{O}}$ は、 $q1_{\mathbb{O}}=q_{wu}=q_{u}=q_{uA}$ より、

$$q1_{(1)} = (T_w - T_A) / (\frac{1}{\alpha_{wu}} + \frac{d_u}{\lambda_u} + \frac{1}{\alpha_{uA}})$$
(3-5)

となる。

ここで、α_{wu}は水からウレタンへの熱伝達率(W/(m²·K))、

である。したがって、ウレタンからの伝熱による放熱 Q10は、

 $Q_{1(1)} = q1_{(1)} \times A_{top}$

(3-6)

で計算できる。ここで、A_{top}は上部保温材(ウレタン)の面積(m²)である。

ii) 水より空気への放熱

空気と直接接する水から空気への熱伝達による熱流速 qwA(W/m²)は、下式により計算する。

$$q_{wA} = \alpha_{wA} \times (T_w - T_A)$$
(3-7)

ここで、 α_{wA} は水から空気への熱伝達率($W/(m^2 \cdot K)$)である。したがって、水面からの伝熱による単位時間あたりの放熱 Q_{12} は、

$$Q_{1(2)} = q_{wA} \times A_w$$
 (3-8)
ここで、 A_w は水面が空気と接触する面積(m²)で、

$$A_{\rm w} = \pi \times \left(\frac{4.5}{2}\right)^2 - A_{\rm top}$$
(3-9)

である。

iii) 上部水面からの蒸発による放熱

水面からの蒸発による放熱 Q13は、下式により計算できる。

 $Q_{1(3)} = q \mathbf{1}_{(3)} \times \mathbf{A}_{\mathbf{w}} \tag{3-10}$

ここで、Awは水面が空気と接触する上部の面積(m²)である。また、q1₃は上面からの蒸発による熱流速(W/m²)で、下式により求められる⁽¹⁾。

 $q1_{(3)} = (0.114v + 0.134) \times (P_w - P_A) \times 0.2788r(T_w)$ (3-11)

なお、vは水面上の風速(m/s)

Pwは水温と等しい飽和空気の水蒸気圧(kPa)、

PAは空気の水蒸気分圧(kPa)、

r(Tw)は水温に等しい温度の飽和蒸気の蒸発潜熱(kJ/kg)

である。飽和空気の水蒸気圧(kPa)は、August 他の下記近似式⁽²⁾により求める。

$$P_{\rm w}(T_{\rm w}) = 0.61078 \times 10^{(7.5 \times T_{\rm w})/(T_{\rm w} + 237.3)}$$
(3-12)

さらに、空気の水蒸気分圧は、相対湿度 hum(%)により、下式で求める。

$$P_{A}(T_{A}) = h_{um} /100 \times P_{w}(T_{A})$$
(3-13)
したがって、上部からの放熱量 Q₁ は
Q₁ = Q₁₍₁₎ + Q₁₍₂₎ + Q₁₍₃₎ (3-14)

で計算できる。

(2) 側部からの放熱量

タンク側面にはステンレス製容器の外側に発泡プラスチック系断熱材(ポリスチレンフォーム) が取り付けられ、その外側にステンレス製のカバー板が取り付けられた3層構造となっている。 そこで、伝熱モードとして、図3.1-3に示す熱伝達及び熱伝導のモードを考慮する。

水からステンレス鋼製容器への熱伝達による熱流速を q_{ws} (W/m²)、ステンレス製容器内の熱伝 導による熱流速を q_{sus} (W/m²)、断熱材内の熱伝導による熱流速を q_{pol} (W/m²)、ステンレス製カバ 一板内の熱伝導による熱流速を q_{cov} (W/m²)、ステンレス製カバー板から空気への熱伝達による熱 流速を q_{cA} (W/m²) とすると、これらは次式で示される。

$$q_{ws} = \alpha_{ws} \times (T_w - T_{sw})$$
(3-15)

$$q_{sus} = (\lambda_{sus}/d_{sus}) \times (T_{sw} - T_{spol})$$
(3-16)

$$q_{pol} = (\lambda_{pol}/d_{pol}) \times (T_{spol} - T_{pols})$$
(3-17)

$$q_{cov} = (\lambda_{cov}/d_{cov}) \times (T_{pols} - T_{covA})$$
(3-18)

$$q_{cA} = \alpha_{cA} \times (T_{covA} - T_A)$$
(3-19)

ここで、α_{ws}は水からステンレス製容器への熱伝達率(W/(m²・K))、

 α_{cA} はステンレス製カバー板から空気への熱伝達率 $(W/(m^2 \cdot K))$ 、

T_{sw}はステンレス製容器の水側表面度(℃)、

T_{spol}はステンレス製容器の断熱材側表面度(℃)、

T_{pols}は断熱材のステンレス製カバー板側表面温度(℃)、

T_{covA}はステンレス製カバー板の空気側表面温度(℃)、

 λ_{sus} はステンレス製容器の熱伝導率 (W/($m\cdot K$))、

λpolは側部断熱材の熱伝導率(W/(m·K))、

λ_{cov}はステンレス製カバー板の熱伝導率(W/(m·K))、

dsus はステンレス製容器の側部厚さ(m)、

dpol は側部断熱材の厚さ(m)、

である。

側部からの放熱による熱流速 q_{side} は、q_{side}=q_{ws}=q_{pol}=q_{cov}=q_{cA}より、

$$q_{side} = (T_{w} - T_{A})/(\frac{1}{\alpha_{ws}} + \frac{d_{sus}}{\lambda_{sus}} + \frac{d_{pol}}{\lambda_{pol}} + \frac{d_{cov}}{\lambda_{cov}} + \frac{1}{\alpha_{cA}})$$

となる。

(3-20)

したがって、側部からの放熱量Q2(W)は、

 $Q_2 = q_{side} \times A_{side}$

(3-21)

(3-26)

ここで、A_{side}は側面の面積(m²)である。

(3) 下部からの放熱量

タンク下部はステンレス製容器が基礎のコンクリート上に設置された構造となっている。そこ で、伝熱モードとして、図 3.1-4 に示す熱伝達及び熱伝導のモードを考慮し、コンクリート下面は 一定の温度境界とする。

水からステンレス鋼製容器への熱伝達による熱流速を q_{ws} (W/m^2)、下部ステンレス製容器内の 熱伝導による熱流速を q_{sus} (W/m^2)、コンクリート内の熱伝導による熱流速を q_{con} (W/m^2)とする と、これらは次式で示される。

$$q_{ws} = \alpha_{ws} \times (T_w - T_{sw})$$
(3-22)

$$q_{sus} = (\lambda_{sus}/d_{bsus}) \times (T_{sw} - T_{scon})$$
(3-23)

$$q_{con} = (\lambda_{con}/d_{con}) \times (T_{scon} - T_{bcon})$$
(3-24)

ここで、T_{scon}はステンレス製容器下面のコンクリート側表面度(℃)、

 T_{bcon} はコンクリートの下面温度 (\mathbb{C})、

dbsus はステンレス製容器の底部厚さ(m)、

dcon はコンクリートの厚さ(m)

である。

下部からの放熱による熱流速 qbot は、qbot=qws=qsus=qcon より、

$$q_{bot} = (T_{w} - T_{bcon}) / (\frac{1}{\alpha_{ws}} + \frac{d_{bsus}}{\lambda_{sus}} + \frac{d_{con}}{\lambda_{con}})$$
(3-25)

となる。

したがって、下部からの放熱量Q3(W)は、

 $Q_3 = q_{bot} \times A_{bot}$

で計算できる。ここで、Abot は下面の面積(m²)である。

以上より、放熱量の計算結果から、dt 時間当たりの放熱量 Qout(J)は、

 $Q_{out} = (Q_1 + Q_2 + Q_3) \times dt$ (3-27)

で計算できる。

3.1.3 水槽温度の評価

水槽の加熱開始から t 秒後の水温を T_wとすると、このとき、水への dt 時間あたりの水槽への入熱量 $Q_{in}(J)$ と水槽からの放熱量 $Q_{out}(J)$ の差が水槽温度を dT_wだけ変化させるものとすると、

$$Q_{in} - Q_{out} = V_w \times \rho \ (T_w) \times C_w(T_w) \times dT_w$$
(3-28)

ここで、V_wは容器内の水の体積(m³)である。 したがって、式(3-1)、(3-27)及び (3-28)より、下式が導かれる。

$$\frac{dT_w}{dt} = \frac{(C_w(T_w) \times (T_{in} - T_w) \times V_{in} \times \rho(T_w) - (Q_1 + Q_2 + Q_3))}{(V_w \times \rho(T_w) \times C_w(T_w))}$$
(3-29)

3.2 解析条件

水槽の温度挙動は、(3-29)式を解くことにより計算できる。ここでは、比較的解析精度が良い とされる Runge-Kutta 法⁽³⁾により、数値計算にて解析する。Runge-Kutta 法では、

$$\frac{dy}{dt} = f(t, y)$$
, $y(t_0) = y_0$ (3-30)

の形で与えられる微分方程式を数値計算にて近似的に解くことができる。小さなステップ幅 h に 対して、 y_{n+1} 、 t_{n+1} を下式で与えると、 y_{n+1} は $y(t_{n+1})$ の近似として計算できる。これを繰り返し計算 することにより、初期値 y_0 から任意の時刻 t_n における近似値 y_n が求められる。ここで、

 $y_{n+1} = y_n + \frac{h}{6} \times (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$ $t_{n+1} = t_n + h$ (3-31)

なお、

$$k_{1} = f(t_{n}, y_{n})$$

$$k_{2} = f(t_{n} + \frac{h}{2}, y_{n} + \frac{h}{2}k_{1})$$

$$k_{3} = f(t_{n} + \frac{h}{2}, y_{n} + \frac{h}{2}k_{2})$$

$$k_{4} = f(t_{n} + h, y_{n} + hk_{3})$$
(3-32)
である。本水槽の温度挙動解析で記載したパラメータの一覧表を表 3.2-1 に示す。

解析では、水の比熱 $C_w(T_w)$ は、今回の水温の対象範囲(温度 $0^{\circ}C \sim 80^{\circ}C$)でほとんど変化しないため、「水(軽水)の飽和状態の物性値」⁽⁴⁾より温度 $50^{\circ}C$ の値(C_w =4.18)を用いる。また、密度 $\rho(T_w)$ は、水の物性値表⁽⁴⁾から 2 次曲線近似し、下式を用いる。解析で用いた密度の温度依存性について、データとともに図 3.2-1 に示す。

 $\rho(T_w) = -0.0036{T_w}^2 - 0.0701T_w + 1000.5$

また、飽和蒸気の蒸発潜熱r(T_w)(kJ/kg)は、水の物性値表⁽⁴⁾より水温の関数として下式で近似する。

 $r(T_w) = -2.437T_w + 2502.6$

解析で用いた蒸発潜熱の温度依存性について、データとともに図 3.2-2 に示す。

入熱温度は実測条件を踏まえて、試験開始から400分(24000s)までは65℃、それ以降は75℃とし、1800分(108000s)まで計算した。なお、試験時の室温は24.7℃、初期の水温 T_{w(0)}(℃)は20.8℃である。解析で設定した熱伝導率などのパラメータを表3.2-2に示す。なお、パラメータの設定根拠などの詳細については、続報を参照されたい。

(3-34)

(3-33)

3.3 解析結果

水槽の温度挙動の解析フローを図 3.3-1 に示す。初期データを入力後、まず、水温により変化す る水の密度 ρ(T_w)などのパラメータを計算する。その後、時間を増分させながら Runge-Kutta 法に より Tw を計算する。試験開始から 400 分(約 6.7 時間)までは T_w=65℃、それ以降は T_w=75℃の 条件で繰り返し計算を行い、30 時間に達したときに計算を終了し、結果を出力するようにした。

最大流量により加熱した場合の水槽の温度挙動を図 3.3-2 に示す。流入温度 65℃の温水により、 試験開始から 400 分後(約 6.7 時間後)に約 43℃に達し、流入温度 75℃の温水に変えると温度上 昇率が少し増大しているのがわかる。目標とする 60℃の温度には、昇温開始約 13 時間後に達し ている。なお、これは実測結果の到達時間約 24 時間後と比べると半分程度の時間となっている。 本解析は、あくまでも最大の流量を仮定した場合の予測結果であるため、この違いを生じたもの と考えられる。昇温試験では流量が計測されていないため、流量の予測も重要な因子である。こ れについては、4.考察において流量と温度挙動の観点から検討する。

項目	記号 (単位)
時間	T (s)
流入水の温度	T _{in} (°C)
水温	T_w (°C)
初期の水温	$T_{w(0)}$ (°C)
空気の温度	T _A (°C)
水の流入量	V_{in} (m ³ /s)
容器内の水の体積	V_w (m ³)
微小時間	dt (s)
入熱量	Q_{in} (J)
放熱量	Q_{out} (J)
水の比熱(水温 Twの関数)	$C_w(T_w) (J/(kg \cdot K))$
温度差 (=T _{in} -T _w)	∠T (°C)
水の密度(水温 Twの関数)	ρ (T _w) (kg/m ³)
上部からの放熱量	\mathbf{Q}_1 (W)
上部ウレタンからの伝熱による放熱量	$\mathbf{Q}_{1\odot}$ (W)
上部水面からの伝熱による放熱量	$\mathbf{Q}_{1 \oslash}$ (W)
上部水面からの蒸発による放熱	\mathbf{Q}_{13} (W)
側部からの放熱量	Q_2 (W)
下部からの放熱量	\mathbf{Q}_3 (W)
上部ウレタンからの放熱による熱流速	$q1_{\odot}$ (W/m ²)
上部水面からの蒸発による熱流速	$q1_{\odot}$ (W/m ²)
上部水面からの放熱による熱流速	q_{wA} (W/m ²)
側部からの放熱による熱流速	q_{side} (W/m ²)
下部からの放熱による熱流速	$q_{ m bot}~(W/m^2)$
水からウレタンへの熱伝達による熱流速	q_{wu} (W/m ²)
ウレタン中の熱伝導による熱流速	$q_u (W/m^2)$
ウレタンから空気への熱伝達による熱流速	q_{uA} (W/m ²)
水からステンレス鋼製容器への熱伝達による熱流速	q_{ws} (W/m ²)
ステンレス製容器内の熱伝導による熱流速	q_{sus} (W/m ²)
断熱材内の熱伝導による熱流速	q_{pol} (W/m ²)
ステンレス製カバー板内の熱伝導による熱流速	$q_{\rm cov}$ (W/m ²)
ステンレス製カバー板から空気への熱伝達による熱流速	q_{cA} (W/m ²)
コンクリート内の熱伝導による熱流速	q_{con} (W/m ²)
水からウレタンへの熱伝達率	$\alpha_{wu} (W/(m^2 \cdot K))$
ウレタンから空気への熱伝達率	$\alpha_{uA} (W/(m^2 \cdot K))$

表 3.2-1 水槽の温度挙動解析に関するパラメーター覧表 (1/2)

水から空気への熱伝達率	$\alpha_{\rm wA} (W/(m^2 \cdot K))$
水からステンレス製容器への熱伝達率	$\alpha_{\rm ws} (W/(m^2 \cdot K))$
ステンレス製カバー板から空気への熱伝達率	$\alpha_{\rm cA} (W/(m^2 \cdot K))$
ウレタンの水側表面温度	T_{u1} (°C)
ウレタンの空気側表面温度	T_{u2} (°C)
ステンレス製容器の水側表面度	T_{sw} (°C)
ステンレス製容器の断熱材側表面度	T_{spol} (°C)
断熱材のステンレス製カバー板側表面温度	T_{pols} (°C)
ステンレス製カバー板の空気側表面温度	T_{covA} (°C)
ステンレス製容器下面のコンクリート側表面度	T_{scon} (°C)
コンクリートの下面温度	T_{bcon} (°C)
ウレタンの熱伝導率	$\lambda_{\rm u} (W/(m \cdot K))$
ステンレス製容器の熱伝導率	$\lambda_{sus} (W/(m \cdot K))$
側部断熱材の熱伝導率	$\lambda_{\text{pol}} (W/(\mathbf{m} \cdot \mathbf{K}))$
ステンレス製カバー板の熱伝導率	$\lambda_{\text{cov}} (W/(\mathbf{m} \cdot \mathbf{K}))$
コンクリートの熱伝導率	$\lambda_{\text{con}} (W/(\mathbf{m} \cdot \mathbf{K}))$
ウレタンの厚さ	d _u (m)
ステンレス製容器の側部厚さ	d_{sus} (m)
側部断熱材の厚さ	d _{pol} (m)
ステンレス製カバー板の厚さ	d_{cov} (m)
ステンレス製容器の底部厚さ	d _{bsus} (m)
コンクリートの厚さ	d_{con} (m)
ウレタンの面積	A_{top} (m ²)
水面が空気と接触する上部の面積	A_w (m ²)
側面の面積	A_{side} (m ²)
下面の面積	A_{bot} (m ²)
水面上の風速	v (m/s)
水温と等しい飽和空気の水蒸気圧	P _w (kPa)
空気の水蒸気分圧	P _A (kPa)
水温に等しい温度の飽和蒸気の蒸発潜熱	$r(T_w)$ (kJ/kg)
相対湿度	h _{um} (%)
Runge-Kutta 法の時間ステップ幅	h
Runge-Kutta 法の係数	k1
Runge-Kutta 法の係数	k2
Runge-Kutta 法の係数	k3
Runge-Kutta 法の係数	k4

表 3.2-1 水槽の温度挙動解析に関するパラメーター覧表 (2/2)

パラメータ、記号	設定値(単位)
流入水の温度、 T _{in}	$65~(^\circ\!\!C)~/75~(^\circ\!\!C)$ *1
初期の水温、T _{w(0)}	20.8 (°C)
空気の温度、TA	24.7 (°C)
水の流入量、V _{in}	3.33×10^{-3} (m ³ /s) (=12 (m ³ /h))
容器内の水の体積、Vw	$\pi \times (4.5/2)^2 \times 5 \ (m^3)$
水の比熱(水温 Twの関数)、Cw(Tw)	4180 (J/(kg·K)) *2
水からウレタンへの熱伝達率、 α _{wu}	$500 (W/(m^2 \cdot K))$
ウレタンから空気への熱伝達率、αuA	9 (W/($m^2 \cdot K$)) *3
水から空気への熱伝達率、αwA	9 (W/($m^2 \cdot K$)) *3
水からステンレス製容器への熱伝達率、αws	$500 (W/(m^2 \cdot K))$
ステンレス製カバー板から空気への熱伝達率、αcA	9 (W/($m^2 \cdot K$)) *3
コンクリートの下面温度、T _{bcon}	20.8 (°C) *4
ウレタンの熱伝導率、λu	0.03 (W/(m·K))
ステンレス製容器の熱伝導率、λ _{sus}	16.3 (W/(m·K))
側部断熱材(ポリスチレン)の熱伝導率、λ _{pol}	0.042 (W/(m·K))
ステンレス製カバー板の熱伝導率、λcov	16.3 $(W/(m \cdot K))$
コンクリートの熱伝導率、λ _{con}	1.6 $(W/(m \cdot K))$
ウレタンの厚さ、du	5×10^{-2} (m)
ステンレス製容器の側部厚さ、dsus	4×10^{-3} (m)
側部断熱材の厚さ、dpol	5×10^{-2} (m)
ステンレス製カバー板の厚さ、d _{cov}	1×10^{-3} (m)
ステンレス製容器の底部厚さ、dbsus	1×10^{-2} (m)
コンクリートの厚さ、dcon	5×10^{-2} (m)
ウレタンの面積、Atop	$\pi \times (4.5/2)^2 - A_w (m^2)$
水面が空気と接触する上部の面積、Aw	$0.3 (m^2)$
側面の面積、Aside	$\pi imes 4.5 imes 5~(\mathrm{m}^2)$
下面の面積、Abot	$\pi \times (4.7/2)^2 \times 5 \ ({ m m}^3)$
水面上の風速、v	0.5 (m/s) *3
相対湿度、hum	50 (%)
Runge-Kutta 法の時間ステップ幅、h	1800 (s)

表 3.2-2 水槽の温度挙動解析条件 (昇温試験時の解析)

*1:実験より、試験開始から 400 分(24000s) まで 65℃、それ以降は 75℃。

*2:水の比熱は温度によりほとんど変化しないため、一定値(50℃の値)。

*3:屋内での値。

*4:コンクリートの下面境界温度として、初期水温(一定値)を設定。



図 3.1-1 水槽の昇温試験に対する解析モデル



図 3.1-2 上部からの放熱量評価モデル



図 3.1-3 側部からの放熱量評価モデル



図 3.1-4 底部からの放熱量評価モデル







図 3.2-2 水の蒸発潜熱の温度依存性



図 3.3-1(1) 水槽の温度挙動解析フロー



図 3.3-1(2) Runge-Kutta 法による計算フロー



図 3.3-2 最大流量で加熱した場合の水槽の温度挙動

4. 考察

4.1 実測結果に関する考察

図 4.1-1 は、ボイラ出湯温度を 65℃から 75℃に変更させた際の温度変化に注目し、計測開始から 16 時間後までの全計測点の測定データをプロットしたものである。温水温度を変更させた時刻(400分)付近で、わずかなグラフの傾きに変化が見られる。設定変更直前では 1 時間に約 2.0℃の温度上昇であったが、変更直後では 1 時間に約 3.0℃となり、わずかな温度上昇の違いが認められた。

また、熱電対 1-500 では、温度の変動が大きく、5 分間で 2.0℃~4.0℃程度変動している。これ は、熱電対の設置位置が循環配管の噴出口近傍であるため、温水の流れが乱れている影響と考え られる。さらに、昇温を終了させ流れをなくすとその変動は減少し、他の熱電対の温度に収束し ていくことがわかる。

図 4.1-2 は、全ての熱電対(40 点)で計測した温度の平均温度と、TI-1、TIC-2 の温度を1時間 毎にプロットしたものである。昇温を終了させてから2時間後までのデータをプロットしている。 水槽付属の温度計(TI-1、TIC-2)と熱電対の平均温度を比較すると、TI-1の温度よりもTIC-2の 温度の方が熱電対の平均温度に近いことがわかる。TI-1の温度が平均温度よりも3.0℃程度低い傾 向が見られたのは、TI-1温度計はSUS316製のサーモウェル(φ20mm)に被覆されており、この SUSによる伝熱が原因と考えられる。

4.2 解析結果に関する考察

水槽への入熱量と水槽からの放熱量に対する時間変化を図 4.2-1 に示す。水槽の温度上昇に伴い 水槽への入熱量が図に示すように急激に減少している。一方、放熱量は水槽の温度が高くなるに つれて増加する傾向となっている。時間の経過とともに入熱量と放熱量が近接し、水槽の温度上 昇も一定値に漸近する。図 4.2-2 に各放熱面(上面、側面及び下面)からの放熱量の時間変化を示 す。上面、側面には 5cm の断熱材が取り付けられており、これにより高い保温効果が得られてい ることがわかる。なお、側面と上面からの放熱量の違いは、主に側面積と上面積の差によるもの である。

図 4.2-3 に流量を変化させた場合の温度挙動の違いを示す。流量は、最大流量(12m³/h)の75%(9m³/h)、50%(6m³/h)及び 25%(3m³/h)に変化させて解析を行った。流量を減少させるにしたがって温度が一定値に漸近する時間が長くなっていることがわかる。また、65℃の流入温度から75℃に変化させたときの過渡的な温度上昇挙動も、流量を減少させるにつれて緩やかとなっている。図 4.2-4 は流量を変化させた場合の入熱量の変化を示したものである。流量が少ないほど入熱量の時間変化は少なく、10時間以降では入熱量の逆転を生じている。すなわち、昇温開始後 20時間~30時間と長くなるにつれて、入熱量の高いものは流量の少ないものとなっている。ここで、入熱量の図にボイラの加熱能力(約230kW)を破線で記載している。すなわち、これ以上の入熱は、設備上できないことを示唆している。本図よりおおよそを見積もると、流量は最大流量の約40%程度(4.8 m³/h)と想定される。そこで、最大流量の40%の流量を仮定して解析を行った結果を図 4.2-5 に示す。図中、実線は実測データを結んだ曲線である。の印は 0.5 時間刻みで計算した温度を示す。本図から、実験と解析結果がよく一致していることがわかる。



図 4.1-1 計測開始から 16 時間後までの全計測点の温度測定結果



図 4.1-2 温度の比較(1時間間隔)











図 4.2-3 流量を変化させた場合の温度挙動の比較



図 4.2-4 流量を変化させた場合の入熱量の比較



図 4.2-5 最大流量の 40%の場合の温度挙動

5. まとめ

水中ロボット試験用水槽について、水槽を昇温させた場合の水槽内の温度分布及び温度上 昇挙動を把握することを目的に、室温から60℃(最高設定温度)まで昇温させる昇温試験を 実施した。さらに、温度挙動を支配する因子を検討するため、解析的検討を行った。本試験 により得られた結果は以下の通りである。

昇温試験の結果、

- (1) 噴出口近傍を除けば、温度分布は水槽の外周を取り巻く保温材や落し蓋、昇温のための循環に より、ほぼ一定の温度上昇率で上昇する。
- (2) 設定温度である 60℃への到達時間がほぼ同じとなる。すなわち、水槽内の水の温度は、ほぼ 均一に昇温されている。
- また、上部、側部及び下部からの伝熱を考慮した解析的検討の結果、
- (1) 水槽からの放熱量を比較すると、底面からの放熱>側面からの放熱>上面からの放熱となり、 側面及び上面に敷設した断熱材が有効に機能している。
- (2) 流量が少ない程水槽の温度上昇が緩やかとなる。
- (3) ボイラの加熱能力を考慮した流量(最大流量の40%)による解析結果は、実測値とよく一致する。

今回実施した昇温試験は、夏季直前での計測であったが、気温や水温が低い冬季における昇温 時間や、塩水(海水濃度程度)など、水質を変更させた際の温度上昇の挙動を今後把握する必要 がある。また、実測においては、熱電対の補助糸としてポリエチレンロープを使用したが、温度 上昇による伸びなどの影響を考慮し、選定していく必要がある。

さらに、今後、より正確な昇温の制御を可能とするため、流量計の設置による流量の把握が望 まれる。

謝辞

本試験を遂行するにあたり、市坪浩二氏(現、分析・研究施設整備部 整備第1課)、原子力 エンジニアリング株式会社(茨城県那珂郡東海村村)の関根勝則氏、渡邊健太郎氏、市野沢義幸 氏に試験への協力を頂いた。また、実験結果の解析にあたり、楢葉遠隔技術開発センター長石原 正博 博士にご指導を頂いた。ここに関係各位に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 空気調和·衛生工学会,空気調和·衛生工学便覧第14版4給排水衛生 設備編,2010, p.488.
- 2) 岩佐章夫他, 気温上昇に伴う不純ヘリウムカードルガス圧の想定外の上昇, 第91回 2015 年度 春季低温工学・超電導学会, 2015, p.33.
- 3) 小西克章, ルンゲクッタ法による常微分方程式の数値解法, https://www.sit.ac.jp/user/konishi/JPN/L_Support/SupportPDF/Runge-Kutta Method.pdf(参照: 2018年5月28日).
- 4) 日本機械学会, 伝熱工学資料(改訂第5版), 日本機械学会, 2009, p.291.

表 1. SI 基本 単位											
甘大昌	SI 基本単位										
盔半里	名称	記号									
長さ	メートル	m									
質 量	キログラム	kg									
時 間	秒	s									
電 流	アンペア	А									
熱力学温度	ケルビン	Κ									
物質量	モル	mol									
光度	カンデラ	cd									

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立	「単位の例
_{知立} SI 組立単位	1.
和立里 名称	記号
面 積 平方メートル	m ²
体 積 立方メートル	m ³
速 さ , 速 度 メートル毎秒	m/s
加 速 度メートル毎秒毎秒	m/s^2
波 数 毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度 キログラム毎立方メート	ル kg/m ³
面 積 密 度 キログラム毎平方メート	ν kg/m ²
比体積 立方メートル毎キログラ	ム m ³ /kg
電 流 密 度 アンペア毎平方メート	\mathcal{N} A/m ²
磁 界 の 強 さアンペア毎メートル	A/m
量 濃 度 ^(a) , 濃 度 モル毎立方メートル	mol/m ⁸
質量濃度 キログラム毎立方メート	ル kg/m ³
輝 度 カンデラ毎平方メート	ν cd/m ²
屈 折 率 ^(b) (数字の) 1	1
比 透 磁 率 (b) (数字の) 1	1
(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野	では物質濃度

(substance concentration)ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

			SI 租工单位	
組立量	名称	記号	他のSI単位による 表し方	SI基本単位による 表し方
平 面 1	自 ラジアン ^(b)	rad	1 (в)	m/m
立体 1	自ステラジアン ^(b)	$sr^{(c)}$	1 ^(b)	m^2/m^2
周 波 ∛	女ヘルツ ^(d)	Hz	-	s ⁻¹
力	ニュートン	Ν		m kg s ⁻²
圧力,応2	リパスカル	Pa	N/m ²	$m^{-1} kg s^{-2}$
エネルギー,仕事,熱力	± ジュール	J	N m	$m^2 kg s^2$
仕事率, 工率, 放射]	ミワット	W	J/s	$m^2 kg s^{-3}$
電荷,電気	量クーロン	С		s A
電位差(電圧),起電力	ゴボルト	V	W/A	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 1}$
静電容	量 ファラド	F	C/V	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$
電気抵打	1オーム	Ω	V/A	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 2}$
コンダクタンン	マジーメンス	s	A/V	$m^{-2} kg^{-1} s^3 A^2$
磁 〕	ē ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^1$
磁束密加	まテスラ	Т	Wb/m ²	$\text{kg s}^{2} \text{A}^{1}$
インダクタンン	ペーンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^{\cdot 2} A^{\cdot 2}$
セルシウス温度	まセルシウス度 ^(e)	°C		K
光 〕	ミルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照	モルクス	lx	lm/m^2	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^{(f}	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量,比エネルギー分与 カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^{2} s^{-2}$
線量当量,周辺線量当量, 方向性線量当量,個人線量当量	↓シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	$m^2 s^{\cdot 2}$
酸素活	主カタール	kat		s ⁻¹ mol

酸素活性(カタール) kat [s¹ mol
 (a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや ュヒーレントではない。
 (b)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明 示されない。
 (c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d)へルツは周頻現象についてのみ、ペラレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e)センシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。やレシウス度とケルビンの
 (d)ペルジは高頻現象についてのみ、ペラレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e)センジス度はケルビンの特別な名称で、1、通道を表すために使用される。それシウス度とケルビンの
 (f)放射性核種の放射能(activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g)単位シーベルト(PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4.単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

	S	I 組立単位	
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表 面 張 力	コニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m m^{-1} s^{-2} = s^{-2}$
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	kg s ⁻³
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{2} K^{1}$
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2 s^{2} K^{1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^{2} s^{2}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
表 面 電 荷	「クーロン毎平方メートル	C/m ²	$m^2 s A$
電 束 密 度 , 電 気 変 位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
誘 電 卒	コアラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透磁率	ペンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2 kg s^{\cdot 2} K^{\cdot 1} mol^{\cdot 1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^{2} s^{-3}$
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$
放 射 輝 度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	$m^{-3} s^{-1} mol$

	表 5. SI 接頭語											
乗数	名称	記号	乗数	名称	記号							
10^{24}	э 9	Y	10 ⁻¹	デシ	d							
10^{21}	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	с							
10^{18}	エクサ	Е	10^{-3}	ミリ	m							
10^{15}	ペタ	Р	10^{-6}	マイクロ	μ							
10^{12}	テラ	Т	10 ⁻⁹	ナノ	n							
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	р							
10^{6}	メガ	М	10^{-15}	フェムト	f							
10^{3}	+ 1	k	10^{-18}	アト	а							
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z							
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	v							

表6.SIに属さないが、SIと併用される単位			
名称	記号	SI 単位による値	
分	min	1 min=60 s	
時	h	1 h =60 min=3600 s	
日	d	1 d=24 h=86 400 s	
度	•	1°=(π/180) rad	
分	,	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad	
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad	
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²	
リットル	L, 1	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³	
トン	t	$1 t = 10^3 kg$	

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で

名称	記号	SI 単位で表される数値			
電子ボルー	• eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J			
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ^{·27} kg			
統一原子質量単位	ť u	1 u=1 Da			
天 文 単 位	ž ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m			

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg≈133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海 里	М	1 M=1852m
バーン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=(10^{\cdot 12} \text{ cm})^2=10^{\cdot 28} \text{m}^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	の単位しの教徒的な問題は
ベル	В	31単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。
デシベル	dB -	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値	
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J	
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N	
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s	
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{ m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$	
スチルブ	sb	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd cm}^{-2} = 10^4 \text{ cd m}^{-2}$	
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx	
ガル	Gal	1 Gal =1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²	
マクスウエル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{ G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$	
ガウス	G	$1 \text{ G} = 1 \text{Mx cm}^{-2} = 10^{-4} \text{T}$	
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe ≙ (10 ³ /4 π)A m ⁻¹	
(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≦ 」			

は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例						
	4	名利	5		記号	SI 単位で表される数値
キ	ユ		IJ	-	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
$\scriptstyle u$	\sim	ŀ	ゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ				ĸ	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
$\scriptstyle u$				ム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガ		$\boldsymbol{\mathcal{V}}$		7	γ	$1 \gamma = 1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{T}$
フ	T.		N	Ξ		1フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メー	ートル	/系	カラゞ	ット		1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10 ⁻⁴ kg
ŀ				N	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
力			IJ	-	cal	1 cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J (「IT」カロリー), 4.184J(「熱化学」カロリー)
3	ク			~	ц	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$