液体金属中の 9Cr 鋼のキャビテーション壊食に及ぼす液温の影響*

仁村 彰宏^{*1}, 矢田 浩基^{*2}, 服部 修次^{*3}

Effect of Temperature on Cavitation Erosion of 9Cr-Steel in Liquid Metal

Akihiro NIMURA, Hiroki YADA and Shuji HATTORI^{*3}^{*3} Graduate School of Engineering, University of Fukui,
3-9-1 Bunkyo, Fukui-shi, Fukui, 910-8507 Japan

Research on cavitation erosion in liquid metal is very important to confirm the safety of fast breeder reactor and industrial machinery. However, the researches on the cavitation erosion in liquid metal have not been achieved as compared with the study in water. In this study, the effect of temperature on cavitation erosion in liquid metal was clarified. A new cavitation erosion apparatus was developed to carry out erosion test at high temperature in liquid metal, and was confirmed to offer a stable test performance. Test liquid was lead-bismuth alloy and specimen was 9Cr steel and SUS304 steel. The results showed that cavitation erosion rate increases with an increased temperature and reached a peak value at a relative temperature of about 70 degree (the relative temperature was defined as 0° for freezing temperature and 100° for boiling temperature). The erosion rate prediction was discussed for sodium. The erosion rate in sodium was estimated to be located halfway from the rates between lead-bismuth and deionized water.

Key Words : Cavitation, Cavitation Erosion, Liquid Metal, Lead-Bismuth

1. 緒 言

液体金属中のキャビテーション壊食に関する研究は、ナトリウムを冷却材とする高速増殖炉の安全性を確認したり、次世代高速増殖炉を開発⁽¹⁾する上で非常に重要な課題である。ナトリウム中のキャビテーション壊食については、Thiruvengadam らがナトリウム中で純チタン⁽²⁾と SUS316⁽³⁾の壊食速度の温度依存性について検討しているが、最終安定期の壊食速度を使用していて、ASTM 規格で規定されている壊食速度のピーク値と異なるので、従来の壊食速度と直接比較できない欠点がある。Young と Johnston⁽⁴⁾は、ナトリウム中で圧力と温度を変化させて、コバルト基合金 L-605 の振動キャビテーション壊食試験を行い、壊食速度は圧力の増加とともに増加し、温度依存性についてはある温度で極大があることを示唆しているが、詳細については明らかにしていない。最近、高橋ら⁽⁵⁾は、高温・高速ナトリウム流体のキャビテーション特性に関する研究を行い、SUS304 製のベンチュリ管を用いてナトリウム流量 20L/min (のど部流速約 10m/s)で 600 時間の壊食試験を行うと、流路内部に数 10 μ m の大きさのピット状欠陥が観察されることを報告している。

一方、キャビテーション壊食に及ぼす液温の影響については、Plessset⁽⁶⁾が蒸留水中で工業材料の壊食試験を行い、壊食速度が 40°C から 50°C の間で最大値を示すこと、この傾向は水中で材料にほとんど依存しないことを報告している。Hammit⁽⁷⁾は、壊食速度の最大値が各種液体の融点と沸点のほぼ中間の温度で生じるとしている。また、アメリカ材料試験学会規格 ASTM G32⁽⁸⁾では、水中の 25°C 近傍で、液温が 1°C 増加すると壊食速度が 1~2% 増加すると記述している。

ナトリウムの取り扱いが難しいため、ナトリウム中でのキャビテーション試験は非常に困難である。そのため服部ら⁽⁹⁾は、鉛ビスマス中キャビテーション壊食試験を行うことができるように試験装置の開発を行い、鉛ビスマス中と脱イオン水中で壊食試験を行って両試験液中での壊食速度の違いについて検討している。壊

* 原稿受付 2012 年 1 月 25 日

^{*1} 福井大学大学院工学研究科 (〒910-8507 福井県福井市文京 3-9-1)^{*2} 正員, 福井大学大学院工学研究科^{*3} 正員, フェロー, 福井大学大学院工学研究科

E-mail: hattori@u-fukui.ac.jp

Table 1 Chemical composition of the lead-bismuth (mass %)

	Bi	Pb	Sn	Cd
PbBi-68	50	26.7	13.3	10

Table 2 Mechanical and physical property of the lead-bismuth

	PbBi-68
Freezing Point [°C]	68
Boiling Point [°C]	575
Density at 20°C [g/cm ³]	9.38

Table 3 Chemical composition of the test materials

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Nb	Al
9Cr steel	0.09	0.23	0.37	0.02	0.001	0.18	8.82	0.97	0.20	0.07	0.004
SUS304	0.005	0.33	1.76	0.36	0.22	8.49	18.2	—	—	—	—

Table 4 Mechanical and physical property of the test materials

Material	Density [kg/m ³]	Tensile strength [MPa]	HB	HV
9Cr steel	7628	623	171	180
SUS304	7853	672	180	189

Fig.1 Dimension of specimen

食速度に及ぼす液体の種類について検討したところ試験温度が融点と沸点の間のどの位置にあるのかを示す指標である相対温度が同一であれば、各種液体中の壊食速度は液体金属と試験片の密度と音速を組み合わせた式で評価できることを見出している。また、矢田ら⁽¹⁰⁾は、キャビテーション壊食に及ぼす液体金属の種類の影響について検討し、相対温度が同じであれば、3種類の鉛ビスマス中の壊食速度は、水やアルコール等の液体の音響インピーダンスからある程度推定できることを報告している。しかし、服部ら及び矢田らの研究は、試験温度が 75°C~150°C(相対温度 1.4°~16°)の比較的低温度領域の壊食試験に終始している。

本研究では、試験温度 68°C~400°C(相対温度 0°~65.5°)でキャビテーション壊食試験が可能な試験装置を開発し、試験装置の性能試験を行った。また、高温領域での壊食試験を行い、試験温度が壊食速度に及ぼす影響を明らかにした。さらに、これまで報告している脱イオン水中での試験結果⁽⁹⁾と本研究の鉛ビスマス中の試験結果を用いてナトリウム中の壊食速度の予測法について検討した。

2. 試験材料及び試験方法

2・1 試験材料及び試験装置

試験に使用した液体金属は、表 1 に示すように成分が Bi, Pb, Sn, Cd からなる融点が 68°C の低融点 PbBi 合金である。表 2 は物理的・機械的性質を示したものである。試験材料は、高速増殖実証炉の配管材料として使用予定の 9Cr 鋼と、高速増殖炉「もんじゅ」の配管に使用されているオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 である。表 3 は 9Cr 鋼と SUS304 の化学成分、表 4 は物理的及び機械的性質を示したものである。また、図 1 は試験片形状を示したものである。

本研究では最初に、PbBi 合金中でのより高温領域でのキャビテーション壊食試験を行うために ASTM G32⁽⁸⁾

Fig.2 Test apparatus

Fig.3 Photo of test apparatus

に準じたピエゾ圧電式振動装置と液体金属を一定の温度に保持する恒温液槽から構成される試験装置を開発した。図 2 は、開発した試験装置の試験液槽部分を示したものである。図 3 は、試験装置の全体写真である。今回開発した試験装置は、50～400℃までのキャビテーション壊食試験が可能である。高温の液体金属を用いているので、試験装置は高温でも耐えられる必要がある。試験片を試験液につけるとホーンに熱が伝わり、さらにコンバータまで熱が伝わる。コンバータは熱に弱いためにコンプレッサによる冷却と、試験装置の側面から扇風機を用いて冷風を当てることにより冷却した。恒温液槽は、400℃までの壊食試験が行えるように容量 785cm³（直径 10cm×高さ 10cm）のステンレス製ビーカーと 300W のマントルヒータを用いた。試験液を所定温度で一定に保つために温度調節器を用いて、ビーカー内の試験液中の試験片付近に熱電対を設置し、ヒータの電源を ON-OFF 制御した。また、キャビテーション壊食試験を行う際に振動子からの振動エネルギーが熱エネルギーに変換され試験液温が上昇するために、温度を一定に保つ制御が必要である。試験液の温度が上がり過ぎないように試験液中の冷却コイルを設置し、所定温度を超えたらコンプレッサから空気を送り温度上昇を抑えるように制御した。400℃の高温試験時に水冷を用いると水が急に膨張してパイプを破損する恐れがあるので、冷却には空気を用いた。コンプレッサから送る空気量は、試験温度によって空気を送り込み過ぎると試験液温度が急激に下がってしまうため、試験温度によって開度を調節した。

図 4 は、マントルヒータを用いた PbBi 合金昇温試験の結果を示したものである。PbBi 合金は試験開始当初の固体状態から約 5 分後から融解しはじめ、試験時間 10 分～30 分の間では 1 分あたり約 8.2℃、30 分～50 分の間では約 5.6℃温度上昇し、その後温度上昇はゆるやかになるが約 60 分程度で試験可能最高温度 400℃に達する。このように試験温度までの昇温が短時間で行えることが明らかになった。

Fig.4 Temperature shift at heating

Fig.5 Temperature shift at cooling

Fig.6 Stability of the test apparatus

図5は、コンプレッサを用いた PbBi 合金冷却時の温度変化を示したものである。降温試験では、空気量を調整する必要がないためバルブは十分に開いた状態で温度変化を求めた。温度は指数関数的に低下し、冷却開始後5分程度で約100℃冷却され、試験時間10分～20分の間では1分あたり約7.9℃、20分～40分の間では約3.5℃冷却され、冷却開始後50分で約70℃まで冷却される。このように短時間に冷却できることが明らかになった。

図6は、キャビテーション壊食試験を行う際に、マントルヒータの ON-OFF 制御に加えて、冷却空気による温度調節の有無による温度変化を示したものである。冷却空気を用いた場合は試験温度±2℃程度で試験が行え、冷却空気を用いない場合は試験温度が約+5～6℃上昇するので冷却空気を用いた温度制御をすることにより安定した壊食試験が可能である。

2・2 試験方法

キャビテーション壊食試験は、ASTM G32に基づく振動試験片法で行った。振動試験片法は、振動子の増幅ホーンの先端に図1に示す直径16mmの試験片を取り付けて振動させる方法である。振動子の共振周波数は20kHz、振動チップ端面の全振幅 (peak to peak) は40μm (指示計目盛78) で試験を行った。指示値は、BRANSON製のピエゾ圧電式振動装置 (2000bdc) 専用の電圧調節器の設定値である。試験片側面には直径3mmの穴が開いているため、穴に試験液が付着しないように試験片の浸漬深さは3mmとした。また、試験片をホーン先端に取り付ける際に45kN、ホーンを試験装置に取り付ける際に25kNのトルクを作用させて取り付けた。試験温度は100、250、300、350、400℃で行った。また、250～400℃の試験時には試験液体である PbBi 合金の酸化を防止するため Ar ガスを流入し充填させ試験を行った。設定した試験温度までマントルヒータで PbBi 合金を加熱して壊食試験を行い、所定時間ごとに試験片を取り外し、PbBi 合金を試験片から取り除くため、沸騰させた水中で洗浄した。その後、アセトン中で超音波洗浄し、精密天秤 (感度 0.01mg) で質量を測定した。

Fig.7 Cumulative mass loss curve of 9Cr steel in deionized water

Fig.8 MDER curve of 9Cr steel in deionized water

Fig.9 Cumulative mass loss curve of 9Cr steel in PbBi

Fig.10 MDER curve of 9Cr steel in PbBi

3. 試験結果及び考察

3・1 キャビテーション壊食試験結果

PbBi 合金中のキャビテーション壊食試験を実施するのに先立ち、本研究室でこれまで使用している磁わい振動装置⁹⁾を用いて各試験温度での脱イオン水中の 9Cr 鋼のキャビテーション壊食試験を行った。図 7 は、質量減少量曲線を示したもので、質量減少量曲線はいずれの温度においても質量減少量が非常に小さい潜伏期を経た後、直線的に増大する最大速度期に至る。最大速度期の直線部と横軸との交点を潜伏期とすると、いずれの温度でも潜伏期は約 1 時間である。10 時間後の質量減少量は、25°C では 193mg、40°C では 208mg、50°C では 211mg、60°C では 190mg となる。

図 8 は、質量減少量曲線の挙動を詳細に観察するために、図 7 を MDER (平均壊食深さ速度) で整理したものである。MDER は、質量減少量を材料の密度、試験面積 (直径 16mm のチップの面積)、試験時間間隔で除して求めた単位時間当たりの平均壊食深さ速度である。MDER は試験時間と共に増加して約 2~4 時間後にピーク値をとった後減少し、その後ほぼ一定の値となる。

図 9 は、PbBi 合金中の 9Cr 鋼の質量減少量曲線である。PbBi 合金中の試験は、図 3 に示すピエゾ圧電式振動装置を用いて行った。PbBi 合金中においても水中の試験と同様に質量減少量が非常に小さい潜伏期の後、壊食が急速に増加する最大速度期に至る。100°C の PbBi 合金中の潜伏期は、脱イオン水中とほぼ同様の 1 時間程度であるが、最大速度期の勾配は約 3 倍である。250°C では、潜伏期が約 0.3 時間に短くなって最大速度期の傾きが脱イオン水中の約 10 倍となる。300°C では、250°C の PbBi 合金中と潜伏期はほとんど変わらないが、最大速度の勾配がやや大きくなる。350°C と 400°C の PbBi 合金中では質量減少量曲線の挙動がよく似ており、潜伏期が約 0.2 時間に短くなり最大速度期の勾配が脱イオン水中に比べて約 23 倍大きくなる。

図 10 は、PbBi 合金中の 9Cr 鋼の MDER 曲線である。いずれの曲線も試験時間 0.5~2.5 時間の間にピー

Fig.11 Cumulative mass loss curve of SUS304 in PbBi

Fig.12 MDER curve of SUS304 in PbBi

Fig.13 Test specimen surface after test in deionized water (9Cr steel, 60°C, 10h)

Fig.14 Test specimen surface after test in PbBi (9Cr steel, 400°C, 2h)

ク値をとった後減少もしくはほぼ一定の値となる。試験温度が高いほどピーク値は大きく、ピーク後の減衰が大きい。また、ピーク値が小さいほどピークに至る時間が長い傾向が認められる。

図 11 は、PbBi 合金中の SUS304 の質量減少量曲線である。試験温度 300°C での潜伏期が 9Cr 鋼の潜伏期に比べて少し短い、他の温度の潜伏期や最大速度期の勾配は 9Cr 鋼の結果と類似している。試験温度上昇に伴う SUS304 の質量減少量の増加傾向は、9Cr 鋼の結果に比べてより明瞭になる。図 12 は、SUS304 の MDER 曲線である。試験温度 300°C での MDER 曲線は、図 11 に示すように潜伏期が短いためにピークに至る時間が不明瞭であるが他の温度の MDER 曲線は 9Cr 鋼の結果とよく似ている。

図 13 は、60°C の脱イオン水中 10 時間後の試験片表面写真と粗さ計で測定した表面形状である。試験面は外周から約 1mm の距離でほとんど壊食されていない領域があり、その内部が一様に壊食している。図 14 は 400°C の PbBi 中のキャビテーション壊食試験後の試験片表面写真と表面形状である。試験面は、試験開始当初は試験片中央部で壊食が起きやすく端部に比べて激しく壊食していたが、最終的には全面にわたって激しく壊食しており、脱イオン水で壊食試験を行ったような試験片端部の非壊食域が見られない。服部ら⁹⁾は、脱イオン水中の非壊食域の発生は、試験片の振動によって発生する空気の巻き込みのためのクッション効果に基づくものと考察している。しかし、脱イオン水中で振動チップの浸漬深さを 30mm に増加しても同様の現象がみられたので、非壊食域の発生は、脱イオン水中と液体金属中での気泡の流動性の違いであると考えられる。また、液体金属中で壊食が激しくなることは、Young と Johnston⁽⁴⁾ のナトリウム中の試験結果と一致している。

Fig. 15 Relation between relative temperature and MDERmax

Fig. 16 Relation between acoustics impedance and MDERmax⁽⁹⁾ Fig. 17 Relation between $1/(1/\rho_L C_L + 1/\rho_S C_S)\sqrt{\rho_L}$ and MDERmax⁽⁹⁾

図 15 は、9Cr 鋼と SUS304 の試験結果を相対温度と MDER の最大値である MDERmax との関係を整理したものである。PbBi 合金の融点、沸点は表 2 を参照。図 15 から PbBi 合金中の両材料とも似た推移で壊食速度が変化しているのがわかる。特に、9Cr 鋼と SUS304 の試験結果を比較すると矢田ら⁽¹⁰⁾は相対温度 8° の PbBi 合金中での 9Cr 鋼の MDERmax が SUS304 の約 1.3 倍であると報告しており、本試験結果も同様な結果を示す。図 15 中にある値は相対温度が 1° 上昇するごとの壊食速度の増加率である。ASTMG32-03⁽⁸⁾に脱イオン水 25°C 近傍では 1°C 上昇するごとに壊食速度が 1~2% 増加すると報告されている。本実験の結果から PbBi 中では、相対温度が 1° 上昇すると相対温度 10~40° で約 3~4%、相対温度 40~50° で約 6~7% 壊食速度が増加することがわかる。

このように、PbBi 中の壊食速度の温度上昇による増加率は脱イオン水中の 1~2%/° (相対温度) の約 3 倍にもなる。

3・2 ナトリウム中での壊食速度の予測法の検討

緒言でも述べたようにナトリウム中のキャビテーション壊食試験は非常に困難である。本節では、各種温度で得られた PbBi 合金中の 9Cr 鋼の壊食速度と脱イオン水中の 9Cr 鋼の壊食速度を用いてナトリウム中の 9Cr 鋼の壊食速度を予測する方法について検討した。

これまで、さまざまな液体中の壊食速度は、試験液の音響インピーダンス $\rho_L C_L$ に対して指数関数的に増加することが報告されている。そのため、液体金属においても音響インピーダンスで壊食速度を整理した。図 16

Table 5 Mechanical and physical property of the test materials

Liquid	Density [kg/m ³]	Sound velocity [m/s]	Acoustic impedance [g/mm ² s]	$\frac{1}{(\frac{1}{\rho_L C_L} + \frac{1}{\rho_S C_S})\sqrt{\rho_L}} \left[\frac{\sqrt{kg}}{\sqrt{ms}} \right]$
PbBi	10,200	1,690	17,300	120,000
Sodium	891	2,440	2,180	69,000
Deionized water	998	1,490	1,480	45,000
9Cr steel (specimen)	7,630	5,250	40,000	—

は、服部らの文献⁹⁾から引用した音響インピーダンスと SUS304 鋼の MDERmax の関係である。*印はヘプタン、ブチルアルコール、ベンゼン、アニソール、アニソン、ニチレングリコール、三塩化エタン、四塩化炭素、二臭化エチレン、ブロモホルムの結果である。ナトリウムのデータは $\rho_L C_L$ が脱イオン水及び*印に示す液体と同程度であるため各種液体と同様に整理でき、指数関数的に増加しているが、水銀と PbBi 合金のように $\rho_L C_L$ が著しく大きい液体金属の壊食速度は整理することができない。

PbBi や水銀のような液体金属では音響インピーダンス $\rho_L C_L$ が著しく大きいため、壊食試験片の SUS304 の音響インピーダンスと同程度になると予想し、服部ら⁹⁾は、液体金属を含む各種液体中の壊食速度 MDERmax が試験液体及び壊食試験片の密度、及び音速を用いた次式で表せることを見出した。

$$A = 1/(1/\rho_L C_L + 1/\rho_S C_S)\sqrt{\rho_L} \quad (1)$$

ρ , C は密度及び音速, L は試験液体, S は壊食試験片を示す。

図 17 は、相対温度 14°の各種液体中の MDERmax と式(1)の A との関係を示したものである。従来では同様に整理できなかった音響インピーダンスが著しく大きい液体金属と他の試験液がこのパラメータを使用すると同様に整理できる。また、いずれの液体中も次式(2)に示すように両対数紙上でほぼ直線関係にあることがわかる。

$$\text{MDERmax} = kA^n \quad (2)$$

表 5 は、PbBi, ナトリウム, 脱イオン水の密度、音速、音響インピーダンス、試験片が 9Cr 鋼の場合の式(1)の値 A を示したものである。密度、音速、音響インピーダンスは服部らが報告している値⁹⁾を使用した。表中の壊食試験片 9Cr 鋼の密度は今回新たに測定した値で、この値を使用して音速、音響インピーダンスを求めた。脱イオン水の A の値は 45,000, ナトリウムの A の値は水の約 1.5 倍の 69,000, 鉛ビスマスは脱イオン水の約 3 倍の 120,000($\sqrt{kg}/\sqrt{ms}$)となる。

相対温度 20°, 40°, 60°ナトリウム中の 9Cr 鋼の壊食速度を、同一相対温度の脱イオン水中と PbBi 合金中の壊食速度を用いて算出する方法を検討した。具体的には、脱イオン水と PbBi 合金の A の値と、両液中の MDERmax の関係から k と n の値を求め、これらの k と n を式(2)に代入し、ナトリウムの A を用いてナトリウム中の MDERmax を求めるものである。

ここで、密度、音速、音響インピーダンスの温度依存性について検討する。水については、温度 20°C から 60°C に変化しても、密度 ρ は約 15kg/m³ 減少する程度で、20°C での密度 998 kg/m³ から 1.5% ほどしか変化しない。音速 C については約 54m/s の増加で、変化量は 20°C での音速 1486m/s の 3.6% ほどである。音響インピーダンス ρC については、20°C から 60°C への変化で約 31g/mm²s 増加するが、20°C での音響インピーダンス 1484g/mm²s の 2% ほどである。PbBi 合金やナトリウム等の液体金属の密度、音速、音響インピーダンスの温度に伴う変化については十分には明らかになっていないが、ハンドブック¹¹⁾で組成の異なる PbBi に関しての温度依存性が表記されている。ハンドブックの密度の定義式から適用温度範囲である 410~726K の最低・最高温度である 410K と 726K の密度を算出した。410K のとき約 10,516kg/m³, 726K のとき約 10,156 kg/m³ となり温度差は 316K であるが約 3.4% 減少するのみである。また、音速の定義式の適用温度範囲である 433~603K の最低・最高温度である 433K と 603K の音速を算出した 433K のとき約

Table 6 n , k and MDERmax of each in test liquid

Relative temperature [°]	MDERmax in PbBi [$\mu\text{m/h}$]	MDERmax in deionized water [$\mu\text{m/h}$]	n	k	MDERmax in sodium (prediction) [$\mu\text{m/h}$]
20	66.4	18.4	1.31	1.25×10^{-1}	32.0
40	166	23.4	2.00	1.15×10^{-2}	54.8
60	310	17.7	2.91	2.74×10^{-4}	61.9

Table 7 MDERmax [$\mu\text{m/h}$]

Material	Temperature [°C]		
	204 (13.5)	427 (42)	649 (70.3)
L605	15.6	22.6	2.3
SUS304	18.6*	27.0	2.8*
9Cr-steel	44.7*	64.9*	6.7*

() shows relative temperature [°]

* is obtained by calculation

Table 8 Ratio of erosion rates

Material	L605	SUS316	SUS304	9Cr steel
Ratio	1	1.8	2.7	6.5

1764m/s、603K のとき約 1731 m/s となり温度差は 170K であるが約 1.9%減少するのみである。これらより、PbBi 合金の密度、音速の温度変化による変化は小さいものと考えられる。また、図 15 に示す PbBi 中の MDERmax の増加は、音響インピーダンスの変化に伴う気泡の崩壊速度の変化によるものではなく、発生、崩壊する気泡数の増加によるものと考えられる。従って、式(1)、式(2)が各温度で成立し、 n 及び k が温度によって変化するものとする。

表 6 は、相対温度 20°、40°、60°における PbBi 中及び脱イオン水中の MDERmax、式(2)を用いて計算した n と k の値、この n と k 及びナトリウムの A から計算した MDERmax の予測値である。

一方、ナトリウム中の予測値の妥当性を検討するために、Young ら⁽⁴⁾のナトリウム中の Co 基合金の壊食試験結果を本研究の試験条件と同様になるように換算して求めた。Young らは、Co 基合金 L605 の試験片(直径 14.3mm)を用いて、3 種類の温度でナトリウム中での磁わい振動装置を用いたキャビテーション壊食試験を行っているが、SUS316 は 427°C のナトリウム中のみであり、SUS316 の壊食速度は L605 の約 1.8 倍である。さらに、服部ら⁽⁹⁾が SUS316 の壊食速度が SUS304 の約 1.5 倍であること、矢田ら⁽¹⁰⁾がナトリウムと近い密度である脱イオン水中で 9Cr 鋼の壊食速度は SUS304 の約 2.4 倍であることを報告しているので、この換算係数を用いて、L605 の MDERmax を 9Cr 鋼の結果に換算した。この結果を表 7、壊食速度を換算する際に用いた壊食速度比率を表 8 に示す。

図 18 は、PbBi 中及び脱イオン水中の 9Cr 鋼の MDERmax と相対温度の関係の他に、表 6 で求めたナトリウム中の MDERmax の予測値をなめらかに結んだ曲線と表 7 に示す Young ら⁽⁴⁾のナトリウム中の壊食試験結果から換算した実験値を示したものである。ナトリウム中の予測値は、図中緑色の曲線で示すように PbBi 中と脱イオン水中のほぼ中間に位置する。相対温度 20°と 40°の予測値は、実験値に比べてやや小さいが、温度上昇に伴う壊食速度の増加傾向はほぼ一致している。相対温度 70°の実験値は予測結果よりもかなり低い値となっているので今後の検討課題である。

このように、ナトリウム中の壊食速度は、PbBi 中と脱イオン水中の結果から予測が可能であることが明らかになった。

Fig.18 Relation between relative temperature and MDERmax

4. 結 言

本研究では、ASTMG32-03 に準ずる PbBi 合金中 50℃～400℃で試験可能なキャビテーション壊食試験装置を開発、性能試験を行い、キャビテーション壊食試験を行った。また、試験材料である 9Cr 鋼と SUS304 鋼の違い、PbBi 合金中と水中での試験の違いによる壊食量、壊食速度を比較した。さらに、ナトリウム中での 9Cr 鋼の壊食速度の予測値を検討した。これらの結果から以下の結論が得られた。

- (1) 開発した試験装置の性能試験を行った結果、マントルヒータにより約 60 分程度で試験可能最高温度である 400℃まで昇温可能、コンプレッサを用いた空気冷却により 400℃から冷却した場合 50 分で約 70℃に冷却可能、設定温度±3℃の温度範囲で試験が行えることが明らかになった。
- (2) PbBi 合金中では相対温度が 6.3°～65.5°の範囲では試験温度が上昇するにつれて壊食速度が増加する。相対温度 10～40°では相対温度が 1°上昇するごとに約 3～4%、相対温度 40～50°では約 6～7%壊食速度が増加し、水中の場合の 1～2%に比べて大きくなるので注意が必要である。
- (3) ナトリウム中の壊食速度の予測値は、PbBi 合金中と脱イオン水中のほぼ中間となる。

謝 辞

本研究は、特別会計に関する法律（エネルギー対策特別会計）に基づく文部科学省からの受託事業として、福井大学が実施した平成 22 年度「もんじゅ」における高速増殖炉の実用化のための中核的研究開発」の成果を含む。本研究の実験には、福井大学学生的小林佑也の協力を得た。記して謝意を表する。

文 献

- (1) 江連俊樹, 佐藤博之, 木村暢之, 上出英樹, “液中渦によるキャビテーションに関する基礎的検討”, JAEA-Research, 2008-093 (2008), pp.1-35.
- (2) Preiser, H.S., Thiruvengadam, A., and Couchman, C.E., III “Cavitation Damage in Liquid Sodium”, NASA CR-54071 (1964), pp. 1-83.
- (3) Thiruvengadam, A., Preiser, H.S., and Rudy, S.L., “Cavitation Damage in Liquid Metals”, NASA CR-54459 TPR 467-3 (1965), pp.1-29.
- (4) Young, S. G., and Johnston, J. R., “Effect of Temperature and Pressure on Cavitation Damage in Sodium”, ASTM STP 474 (1970) pp.67-108.
- (5) 高橋実, 吉澤善男, 中川順達, 三浦邦明, 浅葉信, Teddy Ardiansyah, Vaclav Dostal, Martin Kulhanek, 平成 21 年度原子力安全基盤調査研究(その 1)(高温・高速ナトリウム流体のキャビテーション特性に関する研究) (2010), pp.1-167, 東京工業大学.

- (6) Plesset, M.S., “Temperature Effects in Cavitation Damage”, *Transactions of the ASME, Journal of Basic Engineering*, No.9 (1972), pp.559-566.
 - (7) Garcia, R., and Hammitt, F. G., “Cavitation Damage and Correlations with Material and Fluid Properties”, *Transactions of the ASME, Journal of Basic Engineering*, No.12 (1967), pp.753-763.
 - (8) ASTM ed., *Annual Book of ASTM standards 2005, Wear and Erosion; Metal corrosion*, G32-03(2005), pp.106-119, ASTM.
 - (9) 服部修次, 井上文貴, 渡士克己, 橋本貴司, “液体金属中のキャビテーション壊食に及ぼす液体パラメータの影響”, 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 73, No. 726 (2007), pp.300-306.
 - (10) 矢田浩基, 倉地宏晃, 月森和之, 服部修次, “液体金属中のキャビテーション壊食に及ぼす液体金属種及び試験材料の影響”, 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 77, No. 773 (2011), pp. 146-153.
 - (11) OECD/NEA Nuclear Science Committee Working Party on Scientific Issues of the Fuel Cycle Working Group on Lead-bismuth Eutectic, ed., *Handbook on Lead-bismuth Eutectic Alloy and Lead Properties, Materials Compatibility, Thermal-hydraulics and Technologies, Edition, Thermophysical and Electric Properties* (2007), Chap. 2 ISBN 978-92-64-99002-9.
-