

JAERI - M  
93-096

ALPHA計画の溶融物冷却材相互作用試験で  
用いるテルミットの比熱及び温度の評価

1993年3月

丸山 結・山野 憲洋・伊藤 秀雄・小森 慶一  
園部 久夫・八木岡隆一・杉本 純

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.  
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division,  
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura,  
Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

ALPHA計画の溶融物冷却材相互作用試験で用いる  
テルミットの比熱及び温度の評価

日本原子力研究所東海研究所燃料安全工学部

丸山 結・山野 憲洋・伊藤 秀雄・小森 慶一

園部 久夫・八木岡隆一・杉本 純

(1993年3月10日受理)

ALPHA（事故時格納容器挙動試験）計画は、軽水炉のシビアアクシデント時において、格納容器に加わる負荷と格納容器からのリークを定量的に評価することを目的としている。ALPHA計画の試験項目の1つである溶融物冷却材相互作用試験では、酸化鉄とアルミニウムとのテルミット反応により生成される溶融物を用いている。溶融物冷却材相互作用試験で発生する水蒸気爆発の熱エネルギーから機械エネルギーへの変換効率の検討等に資するため、溶融したテルミットの比熱及び表面温度を評価した。その結果、比熱は約1000J/(kg·K)、表面温度は反応終了直後において約2700K、反応開始から30秒経過した時点で約2500Kであった。本評価から得られた比熱は、テルミット製作メーカーから入手したテルミット反応生成物（主に鉄と酸化アルミニウム）の高温時参考データと反応生成物の混合割合から推定した値、約960J/(kg·K)とほぼ一致した。

Evaluation of Specific Heat and Temperature of Thermite  
Used in Melt Coolant Interaction Test in ALPHA Program

Yu MARUYAMA, Norihiro YAMANO, Hideo ITO  
Keiichi KOMORI, Hisao SONOBE, Ryuichi YAGIOKA  
and Jun SUGIMOTO

Department of Fuel Safety Research  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received March 10, 1993)

Objectives of ALPHA (Assessment of Loads and Performance of a Containment in a Hypothetical Accident) program are to investigate loads imposed on a containment vessel, and to quantify leak characteristics through the containment during a severe accident of a light water reactor. High temperature melt generated by the thermite reaction between iron oxides and aluminum has been used in the melt coolant interaction test in ALPHA program. Specific heat and temperature at melt surface were evaluated in order to estimate the conversion ratio from thermal to mechanical energy in the event of a steam explosion occurred in the melt coolant interaction test. The evaluated specific heat was about 1000 J/(kg·K), which was close to a calculated value of 960 J/(kg·K) based on the melt composition and material properties at high temperature obtained through the manufacture of thermite. It was found that the surface temperature was about 2700 K immediately after completion of the thermite reaction and it was about 2500 K at 30 seconds after initiation of the thermite reaction.

Keywords: ALPHA Program, Melt Coolant Interaction, Thermite, Specific Heat, Temperature, Conversion Ratio, Steam Explosion, Containment, Severe Accident

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 溶融テルミットの表面温度測定 .....	1
2.1 測定方法 .....	1
2.2 測定結果及び考察 .....	2
3. 溶融テルミットの比熱評価 .....	2
3.1 評価方法 .....	2
3.2 評価結果及び考察 .....	3
3.2.1 評価結果 .....	3
3.2.2 水蒸気発生に起因する誤差の評価 .....	4
3.2.3 放射による放熱量の評価 .....	6
4. おわりに .....	7
謝 辞 .....	7
参考文献 .....	7
付録 1 水中におけるテルミット電熱面積の概算 .....	12
付録 2 水中における熱伝達率の評価 .....	13
付録 3 テルミットの入水速度及び水中における終末速度の評価 .....	15

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Measurement of Surface Temperature of Thermite .....	1
2.1 Measurement Method .....	1
2.2 Results and Discussion .....	2
3. Evaluation of Specific Heat of Thermite .....	2
3.1 Evaluation Method .....	2
3.2 Results and Discussion .....	3
3.2.1 Results .....	3
3.2.2 Error Estimation due to Steam Generation .....	4
3.2.3 Estimation of Radiation Heat Loss .....	6
4. Concluding Remarks .....	7
Acknowledgement .....	7
References .....	7
Appendix 1 Rough Estimation of Heat Transfer Area of Thermite in Water Pool .....	12
Appendix 2 Evaluation of Heat Transfer Coefficient in Water Pool ...	13
Appendix 3 Evaluation of Entrance Velocity of Thermite at Water Surface and Terminal Velocity in Water Pool .....	15

## 1. はじめに

原研では、平成2年9月に策定された安全研究年次計画<sup>1)</sup>に基づき、事故時格納容器挙動試験(ALPHA : Assessment of Loads and Performance of a Containment in a Hypothetical Accident) 計画<sup>2)</sup>を実施している。本計画の目的は、軽水炉のシビアアクシデント時に格納容器に加わる熱負荷、圧力負荷、格納容器貫通部からのリーク挙動、格納容器内エアロゾル挙動を明らかにすることである。

この目的を達成するため、図1に示すシビアアクシデント時に格納容器内で生じる主要な現象のうち以下の4項目の試験を実施し、シビアアクシデント時の格納容器健全性を評価するための知見を得るとともに、アクシデントマネージメント対策の定量的な検討に資することとしている。

- 1) 貫通部リーク定量化試験
- 2) 溶融物冷却材相互作用試験
- 3) 溶融物コンクリート相互作用試験
- 4) エアロゾル挙動試験

上記試験項目のうち溶融物冷却材相互作用試験では、高温の溶融炉心が冷却材と接触した場合に生じる現象と溶融炉心の冷却性を明らかにすることを目的に、溶融物を冷却水中に落下させる溶融物落下水蒸気爆発実験<sup>3)</sup>及び溶融物上に冷却水を供給する溶融物冷却性実験<sup>4)</sup>を実施している。

高温の溶融炉心と冷却材が接触すると水蒸気爆発と呼ばれる激しい相互作用が生じる可能性がある。軽水炉のシビアアクシデント時において原子炉圧力容器あるいは格納容器の健全性が水蒸気爆発により損われるかどうかを評価するためには、溶融炉心の持つ熱エネルギーがどの程度機械的エネルギーに変換されるか、つまり変換効率の値が1つの目安になる。

溶融物冷却材相互作用試験では、模擬溶融炉心として酸化鉄(主にFeO及びFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)とアルミニウムのテルミット反応( $FeO + Fe_2O_3 + Al \rightarrow Fe + Al_2O_3 + \text{発熱}$ )により生成される高温溶融物を用いている。この試験で生じる水蒸気爆発の変換効率を求めるためには、溶融したテルミットの有する初期熱エネルギーを知る必要がある。そこで、初期熱エネルギーを評価に資することを目的に、テルミットの温度と平均比熱を測定、評価するための実験を実施した。特に比熱については、高温時の実測データが無く、またテルミットの組成に依存し得るので、実測による比熱の評価が求められていた。本報告書では測定の方法及び結果について述べる。

## 2. 溶融テルミットの表面温度測定

### 2.1 測定方法

テルミットは反応熱により非常に高い温度に達し、熱電対等の接触型の計測器では測定が困難である。表面温度に限定されるという問題があるが、本測定では、非接触の放射温度計を利用した。表面温度の測定方法を図2に概念的に示す。炭酸ガス硬化モールドを用いて製作した直径11.

## 1. はじめに

原研では、平成2年9月に策定された安全研究年次計画<sup>1)</sup>に基づき、事故時格納容器挙動試験(ALPHA : Assessment of Loads and Performance of a Containment in a Hypothetical Accident) 計画<sup>2)</sup>を実施している。本計画の目的は、軽水炉のシビアアクシデント時に格納容器に加わる熱負荷、圧力負荷、格納容器貫通部からのリーク挙動、格納容器内エアロゾル挙動を明らかにすることである。

この目的を達成するため、図1に示すシビアアクシデント時に格納容器内で生じる主要な現象のうち以下の4項目の試験を実施し、シビアアクシデント時の格納容器健全性を評価するための知見を得るとともに、アクシデントマネージメント対策の定量的な検討に資することとしている。

- 1) 貫通部リーク定量化試験
- 2) 溶融物冷却材相互作用試験
- 3) 溶融物コンクリート相互作用試験
- 4) エアロゾル挙動試験

上記試験項目のうち溶融物冷却材相互作用試験では、高温の溶融炉心が冷却材と接触した場合に生じる現象と溶融炉心の冷却性を明らかにすることを目的に、溶融物を冷却水中に落下させる溶融物落下水蒸気爆発実験<sup>3)</sup>及び溶融物上に冷却水を供給する溶融物冷却性実験<sup>4)</sup>を実施している。

高温の溶融炉心と冷却材が接触すると水蒸気爆発と呼ばれる激しい相互作用が生じる可能性がある。軽水炉のシビアアクシデント時において原子炉圧力容器あるいは格納容器の健全性が水蒸気爆発により損われるかどうかを評価するためには、溶融炉心の持つ熱エネルギーがどの程度機械的エネルギーに変換されるか、つまり変換効率の値が1つの目安になる。

溶融物冷却材相互作用試験では、模擬溶融炉心として酸化鉄(主にFeO及びFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)とアルミニウムのテルミット反応( $FeO + Fe_2O_3 + Al \rightarrow Fe + Al_2O_3 + \text{発熱}$ )により生成される高温溶融物を用いている。この試験で生じる水蒸気爆発の変換効率を求めるためには、溶融したテルミットの有する初期熱エネルギーを知る必要がある。そこで、初期熱エネルギーを評価に資することを目的に、テルミットの温度と平均比熱を測定、評価するための実験を実施した。特に比熱については、高温時の実測データが無く、またテルミットの組成に依存し得るので、実測による比熱の評価が求められていた。本報告書では測定の方法及び結果について述べる。

## 2. 溶融テルミットの表面温度測定

### 2. 1 測定方法

テルミットは反応熱により非常に高い温度に達し、熱電対等の接触型の計測器では測定が困難である。表面温度に限定されるという問題があるが、本測定では、非接触の放射温度計を利用した。表面温度の測定方法を図2に概念的に示す。炭酸ガス硬化モールドを用いて製作した直径11.

5 cmのるっぽに3. 3 kgのテルミットを充填し、溶融物冷却材相互作用試験と同様に反応が表面から下方向に進行するようテルミット上部表面から反応を開始させた。テルミットの深さは反応前後でそれぞれ約15 cm、約8 cmであった。放射温度計はテルミット表面の上方約1 mの位置に設定した。テルミットに含まれている不純物のため、反応に伴い微粒子が多量に発生する。放射温度計による温度測定では、その原理上、被測定物と温度計との間に微粒子等が存在すると測定誤差が大きくなるので、ファンを用いて発生した微粒子を分散させた。また、るっぽ底部に取り付けたタイプK熱電対の破損を検出し、テルミット反応の持続時間を評価した。

## 2. 2 測定結果及び考察

測定条件及び結果を表1にまとめる。テルミットは反応の進行とともに、反応生成物である鉄と酸化アルミニウムの密度差により2層に分離すると推定される。測定に使用した放射温度計は単一波長の強度から表面温度を測定するため、被測定物の放射率を設定しなければならない。本測定の場合は、上層に存在する酸化アルミニウムの放射率が必要になる。しかし、溶融した酸化アルミニウムの放射率に関するデータが見当たらないため、高温固体状態(1800 K)における酸化アルミニウムの放射率(約0.4)<sup>5)</sup>と、測定値に及ぼす放射率の影響を見るために文献値より小さい0.2を設定放射率として用いた。表から分かるように、放射率を0.4とすると、表面温度はテルミット反応完了時点で約2700 K、テルミット反応の開始から30秒経過した時点で約2500 Kであった。放射率を0.2とした場合は、テルミット反応完了時点で約3200 K、テルミット反応開始後30秒で約2700 Kであった。なお、テルミット反応の完了に要する時間は11~15秒であった。

前にも述べたが、放射温度計による温度測定は表面温度に限定されてしまうという問題がある。溶融したテルミットから系外に熱が放出されるため、表面には温度勾配が存在し、テルミット内部は表面よりも高い温度となっている。テルミットが外部から熱的に隔離されていると仮定し、テルミット反応の発熱量(約3350 kJ/kg)とテルミット製作メーカーから入手した物性値に基づいて算出したテルミットの比熱(約960 J/(kg·K))を用いてテルミットの温度を評価すると約3500 Kとなる。したがって、溶融したテルミットの内部温度は2700 Kと3500 Kの間にあると考えるのが妥当であろう。しかしながら、テルミット反応中に外部に熱が放出されること、溶融テルミット内部に存在する対流により表面の温度境界層が薄く、テルミット内部の温度と表面温度との差はあまり大きくないと考えられることから、以下に述べる比熱の評価では、放射率を文献値である0.4に設定した時のテルミット反応完了直後における測定温度を用いた。

## 3. 溶融テルミットの比熱評価

### 3. 1 評価方法

比熱を評価するためには溶融したテルミットの有する初期熱量を測定する必要がある。図3にテ

5 cmのるっぽに3. 3 kgのテルミットを充填し、溶融物冷却材相互作用試験と同様に反応が表面から下方方向に進行するようテルミット上部表面から反応を開始させた。テルミットの深さは反応前後でそれぞれ約15 cm、約8 cmであった。放射温度計はテルミット表面の上方約1 mの位置に設定した。テルミットに含まれている不純物のため、反応に伴い微粒子が多量に発生する。放射温度計による温度測定では、その原理上、被測定物と温度計との間に微粒子等が存在すると測定誤差が大きくなるので、ファンを用いて発生した微粒子を分散させた。また、るっぽ底部に取り付けたタイプK熱電対の破損を検出し、テルミット反応の持続時間を評価した。

## 2. 2 測定結果及び考察

測定条件及び結果を表1にまとめる。テルミットは反応の進行とともに、反応生成物である鉄と酸化アルミニウムの密度差により2層に分離すると推定される。測定に使用した放射温度計は単一波長の強度から表面温度を測定するため、被測定物の放射率を設定しなければならない。本測定の場合は、上層に存在する酸化アルミニウムの放射率が必要になる。しかし、溶融した酸化アルミニウムの放射率に関するデータが見当たらないため、高温固体状態(1800 K)における酸化アルミニウムの放射率(約0.4)<sup>5)</sup>と、測定値に及ぼす放射率の影響を見るために文献値より小さい0.2を設定放射率として用いた。表から分かるように、放射率を0.4とすると、表面温度はテルミット反応完了時点で約2700 K、テルミット反応の開始から30秒経過した時点で約2500 Kであった。放射率を0.2とした場合は、テルミット反応完了時点で約3200 K、テルミット反応開始後30秒で約2700 Kであった。なお、テルミット反応の完了に要する時間は11～15秒であった。

前にも述べたが、放射温度計による温度測定は表面温度に限定されてしまうという問題がある。溶融したテルミットから系外に熱が放出されるため、表面には温度勾配が存在し、テルミット内部は表面よりも高い温度となっている。テルミットが外部から熱的に隔離されていると仮定し、テルミット反応の発熱量(約3350 kJ/kg)とテルミット製作メーカーから入手した物性値に基づいて算出したテルミットの比熱(約960 J/(kg·K))を用いてテルミットの温度を評価すると約3500 Kとなる。したがって、溶融したテルミットの内部温度は2700 Kと3500 Kの間にあると考えるのが妥当であろう。しかしながら、テルミット反応中に外部に熱が放出されること、溶融テルミット内部に存在する対流により表面の温度境界層が薄く、テルミット内部の温度と表面温度との差はあまり大きくないと考えられることから、以下に述べる比熱の評価では、放射率を文献値である0.4に設定した時のテルミット反応完了直後における測定温度を用いた。

## 3. 溶融テルミットの比熱評価

### 3. 1 評価方法

比熱を評価するためには溶融したテルミットの有する初期熱量を測定する必要がある。図3にテ

ルミットの熱量の測定体系を示す。鉄の円筒の内壁を炭酸ガス硬化モールドで覆ったるつぼの中にテルミットの粉末を充填し、下方向に反応が進行するように、テルミットの上部表面から反応を開始させた。溶融したテルミットはるつぼの底のステンレス鋼板を貫通し、るつぼの下に設置した水槽内に落下した。テルミットの落下後、冷却のためるつぼを水槽内にゆっくり沈めた。溶融したテルミットと水との相互作用により水蒸気爆発が起きないことを確認し、テルミット、るつぼ及び水が熱平衡に達するよう水槽の水を素早く攪拌した後、水温の上昇を測定した。図3に示すように、るつぼに設けられた窓ができるだけ小さくして外部への放熱を少なくするとともに、るつぼの内側及び水槽の外側に厚い炭酸ガス硬化モールドを施し、熱の逃げが極力抑えられるようにした。水温上昇に基づいて評価した溶融テルミットの有する初期熱量と前述のテルミットの温度から平均比熱を推定する。

テルミット反応の開始からるつぼの水中投入までに系外に放出される熱量、冷却中に水槽壁から外部へ逃げる熱量及びテルミットが水中を落下する間に水蒸気として系外に放出される熱量を無視し得ると仮定すると、エネルギーバランスは次式で表わされ、溶融したテルミットの初期温度から平衡温度の範囲内についてテルミットの平均比熱を評価できる。

$$C_{pt}M_i(T_{it} - T_f) = C_{pw}M_w(T_f - T_{iw}) + C_{pc}M_c(T_f - T_{ic}) \quad (1)$$

- ただし、  
 $C_{pc}$  : るつぼの比熱 [J/(kg・K)]  
 $C_{pt}$  : テルミットの平均比熱 [J/(kg・K)]  
 $C_{pw}$  : 水の比熱 [J/(kg・K)]  
 $M_i$  : るつぼの質量 [kg]  
 $M_t$  : テルミットの質量 [kg]  
 $M_w$  : 水の質量 [kg]  
 $T_f$  : 热平衡到達後の水温 [K]  
 $T_{ic}$  : るつぼの初期温度 [K]  
 $T_{it}$  : 溶融したテルミットの初期温度 [K]  
 $T_{iw}$  : 初期水温 [K]

るつぼの初期温度から平衡温度までの温度差が小さいので、(1)式の右辺第2項、つまり、るつぼの温度上昇に要する熱量を平均比熱の評価では無視した。

なお、テルミットと水の質量、 $M_t$ 及び $M_w$ は実験前に秤量した。また、水温 $T_f$ 及び $T_{iw}$ についてはアルコール温度計で計測するとともに、熱電対からの信号（水槽上下2点）を連続に計測記録した。

### 3. 2 評価結果及び考察

#### 3. 2. 1 評価結果

表2に溶融テルミット熱量測定の条件と比熱の評価結果を示す。測定はほぼ同一条件で2回行った。2回目の測定において水温の最終測定前後によるつぼの底に小さな穴があき、水が少々漏れたが、

時期が遅いことと漏洩量が非常に少なかったことから、結果には大きな影響を与えない判断した。水温の上昇に基づいて、初期温度から平衡温度まで温度が低下したときのテルミット(0.3kg)のエネルギー変化を求める約730kJとなる。これはテルミット反応の発熱量から評価した値、約1000kJより30%ほど小さい。この原因としては、テルミットの充填形状、テルミット粉末の混合状態、その他の外的条件に起因すると思われるテルミット反応の不均一さ、テルミット粉末の空隙に存在する空気への熱伝達、テルミット粉末含まれる不純物(炭素、水等)及びるつぼ構成物との相互作用等が考えられる。

溶融したテルミットの初期温度を2700Kとすると、(1)式により反応完了直後のテルミットの平均比熱は約1000J/(kg·K)と評価される。この値は実験に使用したテルミットの製作メーカーから入手した高温時(1700~2000°C)物性の参考データと、テルミット反応完了後の鉄と酸化アルミニウムの重量割合から算出した平均比熱、約960J/(kg·K)と同程度である。

### 3. 2. 2 水蒸気発生に起因する誤差の評価

上に記したように、溶融したテルミットの比熱を求めるのにあたり、テルミット反応により発生する熱の系外への逃げは無視できることと仮定している。したがって、高温の溶融テルミットが入水した時に発生する水蒸気が大気中に放出された場合には、水蒸気発生に必要な熱量分だけ比熱は小さく評価される。ここでは、平均比熱の計算に含まれる水蒸気発生に伴う誤差を評価するため、水蒸気の発生量を推定する。水蒸気の発生は、水中に投下された溶融テルミットが水槽の底に到達するまでに発生するもの、水槽の底にあるテルミットにより発生するものとに分けて評価する。

#### (1) 水槽底到達までの水蒸気発生により失われる熱量

ここでは、溶融したテルミットが分離することなく、一体となって円筒状の塊りとして水中を沈降するものと仮定する。

##### ①伝熱面積の評価

使用したテルミットの反応前組成は、ほぼ酸化鉄78%(FeO: 20%, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 80%)、アルミニウム22%である。反応前の組成に基づくと、反応生成物の体積はテルミット0.3kgで80.7cm<sup>3</sup>と評価される。この溶融したテルミットがるつぼ底の開口部直径に等しい直径2cmの円筒として水中を沈降すると仮定すると、高さ25.7cm、表面積167.8cm<sup>2</sup>となる。(詳細は付録1を参照)

##### ②熱伝達率の評価

上記の円筒状溶融物表面における熱伝達を評価するのに、Hsuらのモデル<sup>9</sup>を用いた。Hsuらのモデルは、飽和液中に鉛直に置かれた平板伝熱面からの膜沸騰熱伝達を評価するものであり、実験結果と30%程度の誤差で一致するとHsuらは主張している。理想的には、サブクールを持つ水中に置かれた鉛直円筒伝熱面における強制対流熱伝達のモデルを適用すべきであるが、適用可能なモデルや実験式が見当たらないのでHsuらのモデルで代用した。

水中を沈降するテルミットの表面温度は測定していないが、保守的な仮定として溶融直後の温度を2500°Cとすると、平均熱伝達率は約240W/(m<sup>2</sup>·K)となる。(詳細は付録2を参照)

③沈降時間の評価

溶融したテルミットが水中に突入後、水槽の底に到達するのに要する時間を評価するにあたり、簡単のため、水面での突入速度のまま水中を沈降すると仮定する。るつぼ内の溶融テルミット深さをL、るつぼ底開口部と水面の距離をHとすると、水面への突入速度Vは、gを重力加速度として、

$$V = [2g(L + H)]^{1/2} \quad (2)$$

で示される。保守的な仮定として、Lが0の場合を想定すると（これはるつぼ底の開口部で初速度0に対応する）、Hが1.5. 5 cmであることから、Vは1.75 m/sとなる。この場合、水深が2.6. 2 cmであるので、溶融したテルミットが水中を沈降するに要する時間として0.15秒という値を得る。実際には、るつぼ底の開口部で初速度を持つため、水面への突入速度はより大きくなること、水中での沈降終末速度が上で用いた水面突入時の速度より大きいと推定され、水中沈降中にもさらに加速されると思われることから、テルミットが水中を沈降するに要する時間はさらに短くなると考えられる。（詳細は付録3を参照）

④水蒸気発生に消費される熱量の評価

①から③の結果を合わせて、溶融テルミットが水中を沈降する間に、水蒸気発生により失われる熱量は、テルミットの表面積（167.8 cm<sup>2</sup>）、平均熱伝達率（240 W/(m<sup>2</sup>·K)）、テルミット表面と冷却水との温度差（2400 °C）及びテルミットが冷却水中を落下するのに要する時間（0.15秒）より1437Jとなる。

## (2) 水槽底到達後の水蒸気発生により失われる熱量

①離脱する水蒸気泡の大きさ

膜沸騰状態にある水平平板からの離脱気泡径rは、以下に示すBerenson<sup>7)</sup>の式に従うと、5.76 mmと評価される。

$$r = 2.35[\sigma/(\rho_1 - \rho_v)g]^{1/2} \quad (3)$$

ただし、 $\rho_1$  : 水の密度 [1000 kg/m<sup>3</sup>]

$\rho_v$  : 水蒸気密度 [0.59 kg/m<sup>3</sup>]

$\sigma$  : 気液界面張力 [5.891 × 10<sup>-2</sup> N/m]

②気泡の消滅時間

大きなサブクールを持つ水中を上昇する水蒸気泡は凝縮消滅する。従来の研究から、サブクールの大きい外力の働くない圧力一定の場における気泡の消滅については、Reyleighの理論<sup>8)</sup>が実験とよく一致することが知られている。Rayleighによれば、初期半径 $r_0$ の気泡がつぶれるまでに要する時間tは、周囲圧力を $P_s$ とすると、以下の式で表される。

$$t = r_0(\rho_1/6P_s)^{1/2} \Gamma(5/6) \Gamma(1/2) \Gamma(4/3) = 0.91468r_0(\rho_1/P_s)^{1/2} \quad (4)$$

したがって、 $r_0$ を $5.76 \times 10^{-3}$ m、 $P_s$ を $10^5$ Paとすると、気泡がつぶれるのに要する時間は $5.27 \times 10^{-4}$ 秒となる。

一方、気泡の上昇速度は約 $20\text{ cm/s}$ であるので<sup>9)</sup>、テルミット表面を離脱した水蒸気泡が水面に到達するまでには1秒程度必要である。よって、すべての水蒸気泡は、水中で凝縮し、水蒸気により系外に運び出される熱量はない。

「(1) 水槽底到達までの水蒸気発生により失われる熱量」及び「(2) 水槽底到達後の水蒸気発生により失われる熱量」から、本実験で水蒸気発生により失われる熱量は、最大限、溶融したテルミットが水中を沈降する間に発生する水蒸気として運ばれる、 $1437\text{ J}$ である。これは、テルミットが溶融直後に持っていた熱量 $730\text{ kJ}$ の $0.2\%$ に過ぎず、測定精度を考慮すると無視し得る量である。

### 3. 2. 3 放射による放熱量の評価

溶融したテルミットの初期熱量の測定では、放熱量を最小限に抑えるよう、るっぽに上蓋及び厚い炭酸ガス硬化モールドを施すとともに、テルミットの落下完了後直ちにるっぽ自身を冷却水中に沈めた。テルミット反応の開始から水中への落下までに経過する時間が短いことから、るっぽ側壁から自然対流により外部に放出される熱量は非常に小さいと考えられるので、ここでは溶融テルミットの表面からの熱放射による放熱量のみを評価する。

周囲の気体の熱放射を無視し、溶融したテルミットの表面において、放射により放出される熱がすべて系外に失われると仮定すると、放熱量は以下の式で表される。

$$Q = A_s t \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (5)$$

ただし、 $A_s$  : テルミットの表面積 [ $\text{m}^2$ ]

$Q$  : 放熱量 [J]

$T_s$  : テルミット表面の絶対温度 [K]

$t$  : 時間 [秒]

$\varepsilon$  : 放射率 [-]

$\sigma$  : ステファン・ボルツマン定数 [ $5.67 \times 10^{-8}\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ]

(5)式に妥当な値 ( $A_s : 0.002\text{ m}^2$ 、 $T_s : 2700\text{ K}$ 、 $t : 10\text{ 秒}$ 、 $\varepsilon : 0.4$ ) を代入し、放熱量を評価すると $24\text{ kJ}$ となる。実際にはるっぽの上蓋により放熱が抑制されること、るっぽ内壁の温度上昇に熱が使われること等を考慮すると、 $24\text{ kJ}$ という値は大幅な保守的評価であると言える。たとえ $24\text{ kJ}$ すべてが放出されたとしても反応完了後のテルミットの持つ熱エネルギーの約 $3.3\%$ にしか過ぎず、系外への熱放射に起因する平均比熱の評価誤差は無視できるものと考えられる。

#### 4. おわりに

ALPHA計画の溶融物冷却材相互作用試験で用いるテルミット表面温度及び比熱を評価した。その結果、表面温度は反応終了直後において約2700K、反応開始から30秒経過した時点で約2500K、平均比熱は約1000J/(kg·K)であった。得られた比熱は、テルミット製作メーカーから入手したテルミット反応生成物の高温時参考データと反応生成物の混合割合から推定した値、約960J/(kg·K)とほぼ同等であった。本評価から得られた知見は熱エネルギーから機械エネルギーへの変換効率等、溶融物冷却材相互作用試験で発生する水蒸気爆発の特性を評価する上で極めて有益である。

#### 謝 詞

ALPHA計画の企画、立案、遂行すべてにおいて、早田企画室調査役（元炉心損傷安全研究室室長）のご指導を得た。本測定の実施にあたっては、原子力エンジニアリングの石井、野上、大内、小島各氏の協力を得た。また、テルミットの特性に関する知見を収集するにあたり、株式会社峰製作所、溶接研究室の鈴木理三郎室長の甚大な協力を得た。ここに深く感謝する次第である。

#### 参 考 文 献

- (1) 原子力安全委員会原子力施設等安全研究専門部会：原子力施設等安全研究年次計画（平成3～7年度）、平成2年9月。
- (2) Soda, K. : NUREG/CP-0119, Vol. 2, Proc. 19th Water Reactor Safety Information Meeting, October 28-30, 1991, Bethesda, USA.
- (3) Sugimoto, J. et al. : Proc. 5th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, Vol. III, pp. 890-897, Sep. 21-24, 1992, Salt Lake City, USA.
- (4) Maruyama, Y. et al. : Proc. International Conference on Design and Safety of Advanced Nuclear Power Plants, Vol. III, pp. 23.5-1-23.5-6, Oct. 25-29, 1993, Tokyo, Japan.
- (5) Touloukian, Y. S., Editor : Thermophysical Properties of High Temperature Solid Materials, Vol. 4.
- (6) Hsu, Y. Y. and Westwater, J. W. : Chem. Eng. Prog. Symp. Ser., 30, 15, (1965).
- (7) Berenson, P. J. : J. Heat Transfer, 83, 351, (1961).
- (8) Rayleigh, L. : Philos. Mag., 34, 94, (1917).
- (9) 赤川浩爾：気液二相流、コロナ社、53、(1974)。
- (10) 中口博、本間弘樹：流体力学（上）、地人書館、137、(1987)。

#### 4. おわりに

ALPHA計画の溶融物冷却材相互作用試験で用いるテルミット表面温度及び比熱を評価した。その結果、表面温度は反応終了直後において約2700K、反応開始から30秒経過した時点で約2500K、平均比熱は約1000J/(kg·K)であった。得られた比熱は、テルミット製作メーカーから入手したテルミット反応生成物の高温時参考データと反応生成物の混合割合から推定した値、約960J/(kg·K)とほぼ同等であった。本評価から得られた知見は熱エネルギーから機械エネルギーへの変換効率等、溶融物冷却材相互作用試験で発生する水蒸気爆発の特性を評価する上で極めて有益である。

#### 謝 詞

ALPHA計画の企画、立案、遂行すべてにおいて、早田企画室調査役（元炉心損傷安全研究室室長）のご指導を得た。本測定の実施にあたっては、原子力エンジニアリングの石井、野上、大内、小島各氏の協力を得た。また、テルミットの特性に関する知見を収集するにあたり、株式会社峰製作所、溶接研究室の鈴木理三郎室長の甚大な協力を得た。ここに深く感謝する次第である。

#### 参 考 文 献

- (1) 原子力安全委員会原子力施設等安全研究専門部会：原子力施設等安全研究年次計画（平成3～7年度）、平成2年9月。
- (2) Soda, K. : NUREG/CP-0119, Vol. 2, Proc. 19th Water Reactor Safety Information Meeting, October 28-30, 1991, Bethesda, USA.
- (3) Sugimoto, J. et al. : Proc. 5th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, Vol. III, pp. 890-897, Sep. 21-24, 1992, Salt Lake City, USA.
- (4) Maruyama, Y. et al. : Proc. International Conference on Design and Safety of Advanced Nuclear Power Plants, Vol. III, pp. 23.5-1-23.5-6, Oct. 25-29, 1993, Tokyo, Japan.
- (5) Touloukian, Y. S., Editor : Thermophysical Properties of High Temperature Solid Materials, Vol. 4.
- (6) Hsu, Y. Y. and Westwater, J. W. : Chem. Eng. Prog. Symp. Ser., 30, 15, (1965).
- (7) Berenson, P. J. : J. Heat Transfer, 83, 351, (1961).
- (8) Rayleigh, L. : Philos. Mag., 34, 94, (1917).
- (9) 赤川浩爾：気液二相流、コロナ社、53、(1974)。
- (10) 中口博、本間弘樹：流体力学（上）、地人書館、137、(1987)。

#### 4. おわりに

ALPHA計画の溶融物冷却材相互作用試験で用いるテルミット表面温度及び比熱を評価した。その結果、表面温度は反応終了直後において約2700K、反応開始から30秒経過した時点で約2500K、平均比熱は約1000J/(kg·K)であった。得られた比熱は、テルミット製作メーカーから入手したテルミット反応生成物の高温時参考データと反応生成物の混合割合から推定した値、約960J/(kg·K)とほぼ同等であった。本評価から得られた知見は熱エネルギーから機械エネルギーへの変換効率等、溶融物冷却材相互作用試験で発生する水蒸気爆発の特性を評価する上で極めて有益である。

#### 謝 詞

ALPHA計画の企画、立案、遂行すべてにおいて、早田企画室調査役（元炉心損傷安全研究室室長）のご指導を得た。本測定の実施にあたっては、原子力エンジニアリングの石井、野上、大内、小島各氏の協力を得た。また、テルミットの特性に関する知見を収集するにあたり、株式会社峰製作所、溶接研究室の鈴木理三郎室長の甚大な協力を得た。ここに深く感謝する次第である。

#### 参 考 文 献

- (1) 原子力安全委員会原子力施設等安全研究専門部会：原子力施設等安全研究年次計画（平成3～7年度）、平成2年9月。
- (2) Soda, K. : NUREG/CP-0119, Vol. 2, Proc. 19th Water Reactor Safety Information Meeting, October 28-30, 1991, Bethesda, USA.
- (3) Sugimoto, J. et al. : Proc. 5th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, Vol. III, pp. 890-897, Sep. 21-24, 1992, Salt Lake City, USA.
- (4) Maruyama, Y. et al. : Proc. International Conference on Design and Safety of Advanced Nuclear Power Plants, Vol. III, pp. 23.5-1-23.5-6, Oct. 25-29, 1993, Tokyo, Japan.
- (5) Touloukian, Y. S., Editor : Thermophysical Properties of High Temperature Solid Materials, Vol. 4.
- (6) Hsu, Y. Y. and Westwater, J. W. : Chem. Eng. Prog. Symp. Ser., 30, 15, (1965).
- (7) Berenson, P. J. : J. Heat Transfer, 83, 351, (1961).
- (8) Rayleigh, L. : Philos. Mag., 34, 94, (1917).
- (9) 赤川浩爾：気液二相流、コロナ社、53、(1974)。
- (10) 中口博、本間弘樹：流体力学（上）、地人書館、137、(1987)。

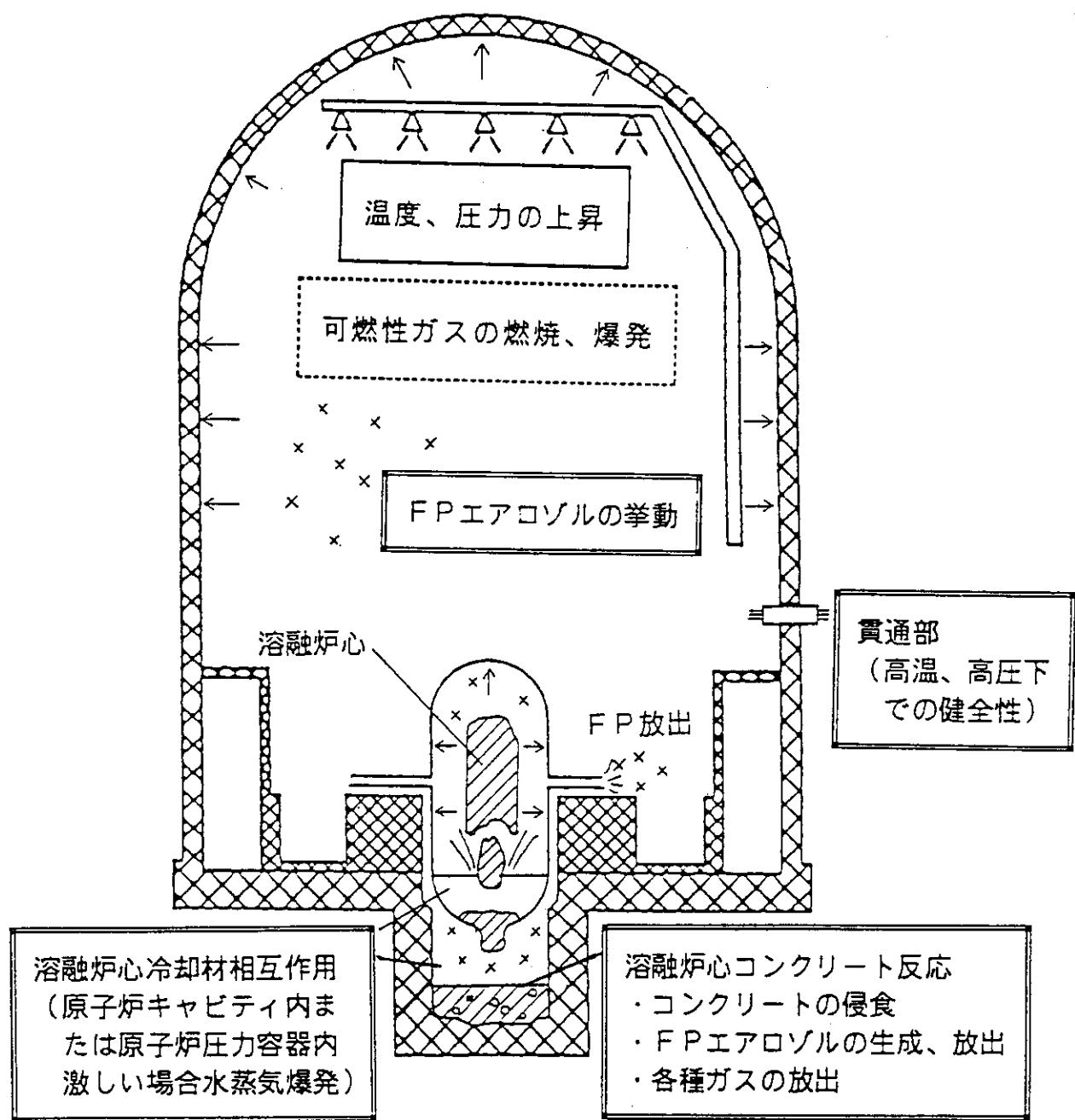


図1 シビアアクシデント時に格納容器の健全性に脅威となる現象

表1 溶融テルミット表面温度測定の条件及び結果

実験番号	テルミット 重量	設定 放射率	テルミット 反応持続時間 [秒]	反応完了時 の表面温度 [K]	反応開始30秒 後の表面温度 [K]
	[kg]	[−]		[K]	
1	3.3	0.4	13	2700	2550
2	3.3	0.4	11	2670	2400
3	3.3	0.2	15	3150	2670

表2 溶融テルミット熱量測定の条件及び比熱の評価結果

実験 番号	テルミット 重量 [kg]	水の 重量 [kg]	水の 初期温度 [°C]	水の 最終温度 [°C]	温度 上昇 [K]	テルミット の温度 [K]	水の 比熱 [J/(kg·K)]	テルミット の比熱 [J/(kg·K)]
1	0.3	15	6.2	18.0	11.8	2700	4191	1026
2 <sup>1)</sup>	0.3	15	7.5	18.8	11.3	2700	4190	983

<sup>1)</sup> テルミットの入水後、水槽底の一部が破損し水が漏洩したが極く少量であった。

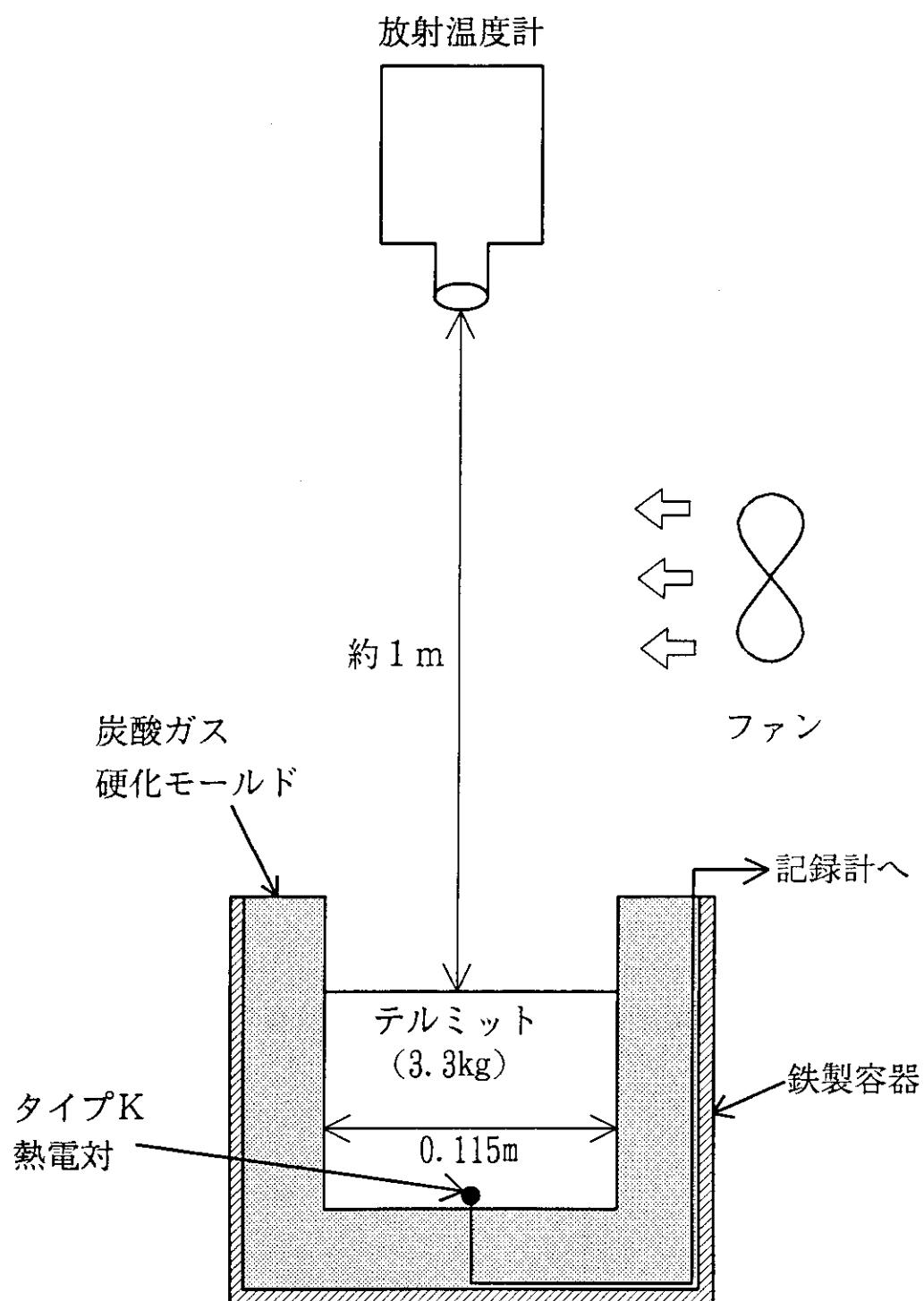
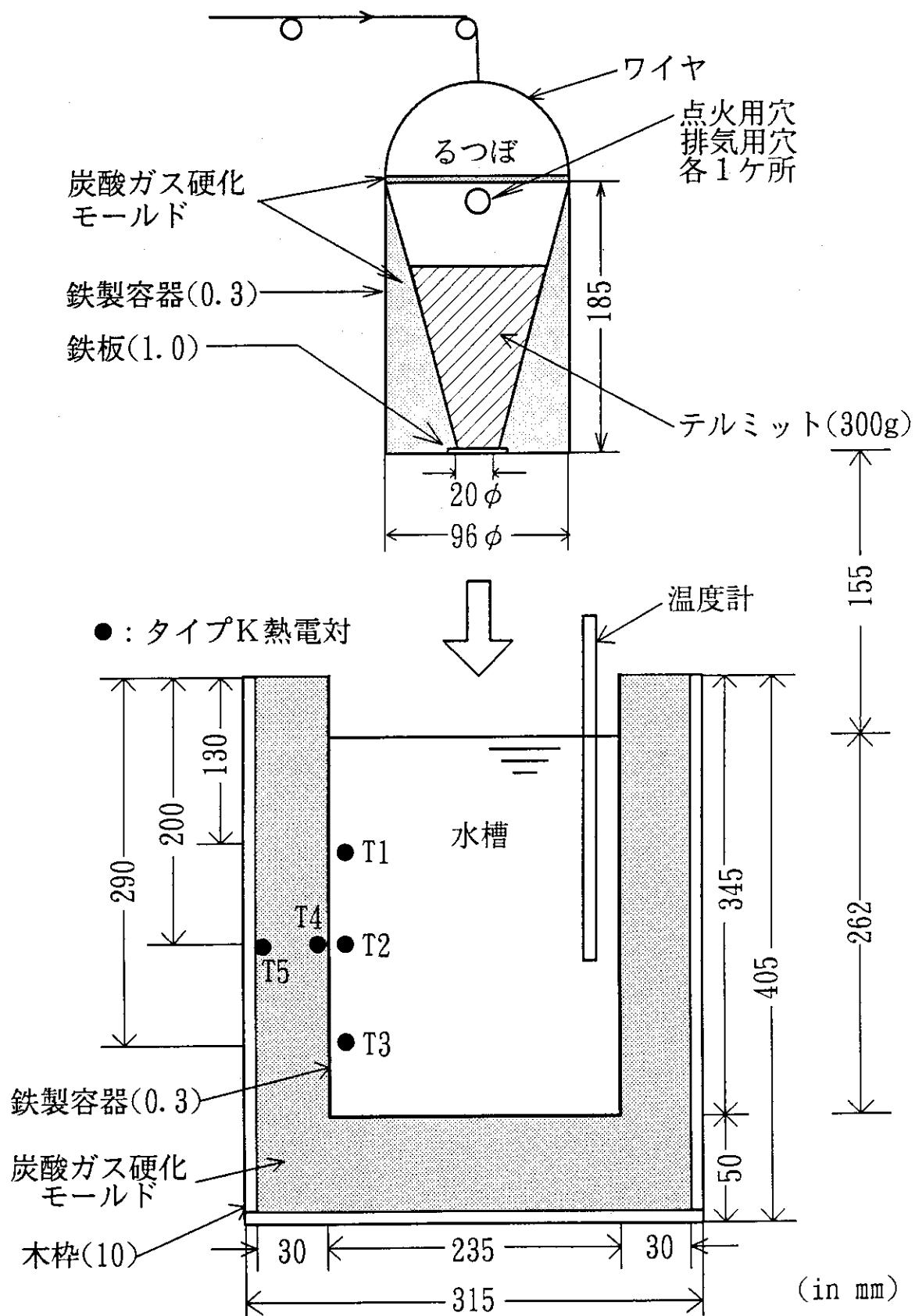


図2 溶融テルミット温度測定の概念



## 付録1 水中におけるテルミット電熱面積の概算

使用したテルミットの組成は概ね、酸化鉄78% ( $\text{FeO}$ : 20%、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ : 80%)、アルミニウム22%である。テルミット300g中に存在する鉄及び酸素の量は、それぞれ167.1g、66.9gとなる。一方、テルミット300g中に含まれるアルミニウム(66g)を酸化アルミニウム( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )に酸化するのに必要な酸素量は58.8gであり、酸化鉄中に含まれる酸素の量より少ないことから、テルミット中のすべてのアルミニウムは $\text{Al}_2\text{O}_3$ になると推定される。逆に酸化鉄については一部残ることになるが、実際には鉄中に含まれる炭素を酸化するのに消費されること、残存する2種類の酸化鉄割合を決定することが困難なことを考慮して、すべての酸化鉄が還元されるものとする。以上の仮定より、300gのテルミットから、167.1gの鉄と、124.8gの $\text{Al}_2\text{O}_3$ が生成される。テルミット製作メーカーから入手した溶融状態の鉄、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ の密度から評価した体積を以下に示す。

鉄の体積	:	24.0 $\text{cm}^3$
$\text{Al}_2\text{O}_3$ の体積	:	56.7 $\text{cm}^3$
全体積	:	80.7 $\text{cm}^3$

次に、この溶融したテルミットがるつぼ底の開口部直径に等しい直径2cmの円筒として水中を沈降するものと仮定すると、高さ25.7cm、表面積167.8  $\text{cm}^2$ になる。

## 付録 2 水中における熱伝達率の評価

HsuとWestwaterは、飽和液中に置いた高さLの鉛直平板の膜沸騰熱伝達について、伝熱面下部では蒸気膜は層流であるが、ある位置で蒸気膜が乱流に遷移し、乱流蒸気膜は粘性底層と乱流層からなると仮定して、沸騰開始点から高さLまでの平均熱伝達率を与える次のモデルを導いた<sup>9)</sup>。

$$\frac{hL}{K_v} = \frac{2\lambda' \mu_v Re^*}{3K_v \Delta T} + \frac{B + 1/3}{A} \times \left[ \left( \frac{2}{3} \left( \frac{A}{B + 1/3} \right) (L - L_0) + \left( \frac{1}{y^*} \right)^2 \right)^{3/2} - \left( \frac{1}{y^*} \right)^3 \right] \quad (A \cdot 1)$$

$$L_0 = \frac{\mu_v Re^* \lambda' y^*}{2K_v \Delta T} \quad (A \cdot 2)$$

$$Re^* = \frac{y^* u^* \rho'_v}{\mu_v} \quad (A \cdot 3)$$

$$y^* = \left[ \frac{2\mu_v^2 Re^*}{g\rho'_v(\rho_L - \rho_v)} \right]^{1/3} \quad (A \cdot 4)$$

$$A = \left( \frac{g(\rho_L - \rho_v)}{\rho_v} \right) \left( \frac{\rho'_v}{\mu_v Re^*} \right)^2 \quad (A \cdot 5)$$

$$B = \frac{\mu_v + \frac{f\rho_v \mu_v Re^*}{2\rho'_v} + \frac{K_v \Delta T}{\lambda}}{\frac{K_v \Delta T}{\lambda}} \quad (A \cdot 6)$$

- ただし、  $K_v$  : 蒸気の熱伝導率  
 $L_0$  : 沸騰開始点から遷移点までの高さ  
 $Re^*$  : 遷移レイノルズ数（100とする）  
 $\Delta T$  : 伝熱面の過熱度  
 $f$  : 蒸気膜液間の摩擦係数（Fanningの抵抗係数）  
 $h$  : 沸騰開始点から高さLまでの平均熱伝達率  
 $u^*$  : 遷移点高さにおける伝熱面から $y^*$ の距離での蒸気の最大速度  
 $y^*$  : 遷移点における蒸気膜の厚さ  
 $\lambda$  : 水の蒸発潜熱  
 $\lambda'$  : 水蒸気の熱容量を考慮した蒸発潜熱

$$\lambda' = \lambda (1 + 0.34 C_{pv} \Delta T / \lambda)^2$$

ここで、 $C_{pv}$  : 蒸気の定圧比熱

- $\mu_v$  : 蒸気の粘性係数
- $\rho_1$  : 水の密度
- $\rho_v$  : 乱流層における飽和温度蒸気の密度
- $\rho_v'$  : 粘性底層における平均蒸気密度

物性値としては、層流及び粘性底層の部分では水蒸気膜の膜温度（伝熱面と冷却水飽和温度との算術平均）、乱流層においては冷却水飽和温度における値を用いる。具体的には、上に挙げた物性のうち  $\rho_v$  のみ  $0.1 \text{ MPa}, 100^\circ\text{C}$  の水蒸気の値を、その他についてはテルミット表面温度を  $2500^\circ\text{C}$  と仮定して、 $0.1 \text{ MPa}, 1300^\circ\text{C}$  の水蒸気の値を使用した。ただし、蒸気表には最高  $800^\circ\text{C}$  の物性値しか記載されていないので、外挿してこれらの値を求めた。水蒸気膜と冷却水の界面における摩擦係数は、水蒸気と水の相対速度に依存し、その値は不明である。しかし、Hsu らの文献に引用されている摩擦係数が  $0.07 \sim 0.2$  であることから、ここでは、 $0.01$ とした。計算で用いた種々の物性値と、主要な計算結果を以下に示す。

#### 計算に用いた物性値

- $C_{pv}$  :  $2.654 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$
- $K_v$  :  $0.1717 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$
- $f$  :  $0.01$
- $\lambda$  :  $2257 \text{ kJ/kg}$
- $\mu_v$  :  $6.064 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$
- $\rho_1$  :  $999.7 \text{ kg/m}^3$
- $\rho_v$  :  $0.598 \text{ kg/m}^3$
- $\rho_v'$  :  $0.138 \text{ kg/m}^3$

#### 計算結果

- $L_0$  :  $5.2 \text{ cm}$
- $h$  :  $237.8 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$
- $y^*$  :  $0.816 \text{ mm}$

### 付録3 テルミットの入水速度及び水中における終末速度の評価

るつぼ開口部で初速度 $v_0$ の物体（本計算の場合は溶融したテルミット）が重力に従ってHだけ下にある水面に落ちたとすると、水面における速度vは以下の式で示される。

$$v = (v_0^2 + 2gH)^{1/2} \quad (A \cdot 7)$$

一方、るつぼ内にある物体がその底にある開口部から流れ出す時の速度 $v_0$ は、液の深さをLとするTorricelliの定理より次式で表される。

$$v_0 = (2gL)^{1/2} \quad (A \cdot 8)$$

よって、深さLの溶融テルミットがるつぼ底開口部からHだけ下にある水に落ちた場合の水面での速度は次のようになる。

$$v = [2g(L + H)]^{1/2} \quad (A \cdot 9)$$

水中に落ちたテルミットの終末速度Uは、気泡の発生による浮力の影響を無視すると、次式で与えられる。

$$C_D \cdot 1/2 \rho U^2 S = (\rho - \rho_w) V g \quad (A \cdot 10)$$

ただし、 $C_D$  : 抗力係数

$S$  : テルミットの運動方向に垂直な断面積[3. 14 cm<sup>2</sup>]

$V$  : テルミットの体積[80. 7 cm<sup>3</sup>]

$\rho$  : テルミットの密度[3. 72 g/cm<sup>3</sup>]

$\rho_w$  : 水の密度[1 g/cm<sup>3</sup>]

抗力係数は物体の形状や流れのレイノルズ数に依存し、0. 3~2. 3程度の値をとるが、一面が流れに垂直に置かれた立方体の場合の値(1. 05)を参考にして1. 0とすると<sup>10)</sup>、Uは5. 26 m/sとなる。この速度はテルミットの入水速度より大きいので、水中でテルミットはさらに加速されると考えられる。