

リチウムの消火に関する基礎実験

Basic Experiment on Fire-Extinguishing of Lithium

加藤 章一 古川 智弘 平川 康 近藤 浩夫 中村 博雄

Shoichi KATO, Tomohiro FURUKAWA, Yasushi HIRAKAWA
Hiroo KONDO and Hiroo NAKAMURA

大洗研究開発センター
技術開発部

Technology Development Department
Oarai Research and Development Center

本レポートは独立行政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 (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根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
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, 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, 2009

リチウムの消火に関する基礎実験

日本原子力研究開発機構 大洗研究開発センター

技術開発部

加藤 章一、古川 智弘、平川 康、近藤 浩夫⁺、中村 博雄⁺

(2009年10月29日受理)

国際核融合材料照射施設の工学実証・工学設計活動（IFMIF/EVEDA）の下で、中性子発生源となるリチウムターゲット系の工学実証データを取得するための液体リチウム試験ループの設計・製作が進められている。リチウムは、消防法で危険物第3類に指定されており、液体リチウム試験ループの建設にあたっては、リチウム漏えい燃焼事故を想定した対策が必要不可欠である。

本報告は、この燃焼リチウムの消火に関する基礎実験結果についてまとめたものである。実験では、燃焼リチウムに対する各種消火剤の消火挙動を確認し、液体リチウム試験ループに適した消火剤を選定するとともに、当該消火剤の配備量の決定に向けた消火性能について実験的に評価した。

得られた成果の概要は、以下のとおりである。

(1)燃焼リチウム（約250g）に対する3種の消火剤（乾燥砂、膨張真珠岩及び日本ドライケミカル製ナトレックスL）の消火挙動を調べた。その結果、ナトレックスLにおける消火挙動が最も安定しており、リチウムとの反応挙動は視覚的には観察されなかった。

(2)一定のリチウム燃焼面積の下で、リチウム液深を変化させたときのナトレックスLにおける消火性能を調べた。その結果、リチウム液深の増加とともに消火に必要なナトレックスLの量は増加した。本実験範囲（燃焼表面積約270cm²、リチウム液深1~2cm）においては、リチウム液深の1.5倍の厚さに相当する消火剤を散布することにより、リチウムの消火が可能であることを確認した。

大洗研究開発センター：〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

+ 核融合研究開発部門 六ヶ所BAプロジェクトユニット

Basic Experiment on Fire-Extinguishing of Lithium

Shoichi KATO, Tomohiro FURUKAWA, Yasushi HIRAKAWA,
Hiroo KONDO⁺ and Hiroo NAKAMURA⁺

Technology Development Department
Oarai Research and Development Center
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received October 29, 2009)

In order to obtain the engineering data of the lithium target system which is the neutron source of the International Fusion Material Irradiation Facility (IFMIF), design and fabrication of the liquid lithium test loop are being carried out under the Engineering Validation and Engineering Design Activity (EVEDA). Since lithium is specified as a dangerous substance by a Japanese law, the countermeasure against lithium combustion incident is indispensable.

This report summarizes the results of basic experiment on lithium fire-extinguishment. In this experiment, the fire-extinguishing behavior of the fire extinguishers to the lithium was experimentally confirmed, and the fire extinguisher for the liquid lithium test loop is proposed. In addition, the fire-extinguishing performance for the determination of the amount of dispositions of the fire extinguisher was experimentally estimated.

The major results are as follows:

- (1) The fire-extinguishing performance of three kinds of fire extinguishers - dryness sand, pearlite and Natrex-L produced by Nippon Dry Chemical Co. Ltd. - to combustion lithium (about 250g) was examined. The fire-extinguishing behavior by Natrex-L was most stable, and no chemical reaction with lithium was observed visually.
- (2) Effect of the lithium depth on the fire-extinguishing performance of Natrex-L was investigated under the definite area of the lithium combustion surface. It was obtained that the volume (thickness) of fire extinguisher necessary for the fire-extinguishing increased as the lithium depth increased. In this experimental condition (combustion area: 270cm², lithium depth: 1 - 2cm), the minimum thickness of the fire extinguisher was 1.5 times the depth of lithium.

Keywords : Lithium, Fire-extinguishing, Combustion, IFMIF, EVEDA

+ Division of Rokkasho BA Project, Fusion Research and Development Directorate

目 次

1. 緒言	1
2. 実験方法	2
2.1 リチウムの主な特性	2
2.2 消火挙動確認実験方法	2
2.3 消火性能確認実験方法	3
3. 実験結果及び検討	4
3.1 消火挙動確認実験結果	4
3.2 消火性能確認実験結果	5
3.3 液体リチウム試験ループにおける漏えい燃焼リチウムの消火に対する提案	6
4. 結言	8
謝辞	8
参考文献	8
付録	29

Contents

1. Introduction	1
2. Experiments	2
2.1 Physical properties of lithium	2
2.2 Fire-extinguishing test	2
2.3 Performance test	3
3. Results and discussion	4
3.1 Fire-extinguishing behavior	4
3.2 Fire-extinguishing performance	5
3.3 Proposal to fire-extinguishing of leakage lithium in the liquid lithium test loop	6
4. Conclusion	8
Acknowledgements	8
References	8
Appendix	29

図表リスト

【表リスト】

表 2.1-1 リチウム及びナトリウムの主な特性	9
表 2.2-1 消火挙動確認実験の条件	9
表 2.3-1 消火性能確認実験の条件	9
表 3.1-1 消火挙動確認実験結果	10
表 3.2-1 消火性能確認実験結果	11

【図リスト】

図 2.2-1 消火挙動確認実験に用いた容器の形状	12
図 2.2-2 消火挙動確認実験におけるリチウムの燃焼処理状況	12
図 2.3-1 消火性能確認実験に用いた容器の形状	13
図 2.3-2 消火性能確認実験におけるリチウムの燃焼処理状況	13
図 3.1-1 消火挙動確認実験（実験 No.S1）の状態	14
図 3.1-2 消火挙動確認実験（実験 No.P1）の状態	15
図 3.1-3 消火挙動確認実験（実験 No.L1）の状態	16
図 3.1-4 消火挙動確認実験（実験 No.M1）の状態	17
図 3.1-5 消火挙動確認実験（実験 No.S1）の温度変化	18
図 3.1-6 消火挙動確認実験（実験 No.P1）の温度変化	18
図 3.1-7 消火挙動確認実験（実験 No.L1）の温度変化	19
図 3.1-8 消火挙動確認実験（実験 No.M1）の温度変化	19
図 3.1-9 室温（298.15K）におけるO-N-Li系化学ボテンシャル図	20
図 3.1-10 800°C（1073.15K）におけるO-N-Li系化学ボテンシャル図	20
図 3.2-1 消火性能確認実験（実験 No.L1-N0.5）の状態	21
図 3.2-2 消火性能確認実験（実験 No.L2-N2）の状態	22
図 3.2-3 消火性能確認実験（実験 No.L1-N1）の状態	23
図 3.2-4 消火性能確認実験（実験 No.L1-N2）の状態	24
図 3.2-5 消火性能確認実験（実験 No.L1-N3）の状態	25
図 3.2-6 消火性能確認実験（実験 No.L2-N3）の状態	26
図 3.2-7 消火性能確認実験（実験 No.L2-N4）の状態	27
図 3.2-8 リチウム液深と消火剤散布厚さとの関係	28
図 3.3-1 リチウム取扱施設におけるリチウム消火設備対応（例）	28

1. 緒言

国際核融合材料照射施設の工学実証・工学設計活動（IFMIF/EVEDA）¹⁾ の下で、中性子発生源となるリチウムターゲット系の工学実証データを取得するための液体リチウム試験ループの設計・製作が進められている。

リチウムは、第3類危険物に指定されていることから、液体リチウム試験ループの設置に際しては、実験装置の特徴も考慮しながら、適した消火剤を配備する必要がある。そこで、本実験では燃焼リチウムに対する各種消火剤の消火挙動を確認し、液体リチウム試験ループに適した消火剤を選定するとともに、その配備量の決定に向けた消火性能について評価を行った。

2. 実験方法

2.1 リチウムの主な特性

リチウムの主な特性²⁾を表2.1-1に示す。表中には、比較として高速増殖炉の冷却材であるナトリウムの特性³⁾を示した。リチウムは、ナトリウムと同様に化学的に活性な金属材料であり、消防法の第3類危険物（自然発火性物質及び禁水性物質）に指定されおり、消火に水を用いることができない。リチウムの融点は179°C、沸点は1317°Cであり、ナトリウムよりも高い。また、リチウムの密度はナトリウムの約1/2の値である。

2.2 消火挙動確認実験方法

(1) 実験に用いた消火剤

危険物の規制に関する政令（以下、「政令」）では、リチウム火災時の消火剤として、乾燥砂、膨張ひる石または膨張真珠岩が指定されている。また、政令では指定されていないものの、市場にはナトリウムやリチウム等の金属火災用の消火薬剤が流通している。そこで、消火挙動確認実験では、政令で指定されている乾燥砂及び膨張真珠岩に加え、リチウムやマグネシウム用の消火薬剤として販売されている日本ドライケミカル株式会社製の消火薬剤「ナトレックスL」（主成分：塩化ナトリウム）を実験に用いた。また、参考として、ナトリウムやジルコニウム用消火薬剤である同社製のナトレックスM（主成分：炭酸ナトリウム）を併せて実験に用いた。これらの消火剤及び消火薬剤の化学成分等を付録-1に示した。以下、これら消火剤（政令指定）と消火薬剤（同未指定）を総称して消火剤と呼称することとする。

(2) 実験方法

実験条件を表2.2-1に示す。4種類の消火剤を用いて、燃焼リチウムの消火挙動確認実験を実施した。1回の実験に用いるリチウム量は約250gとした。リチウムの燃焼面積は約400cm²であり、火炎がなくなるまで消火剤を散布した。

実験容器の寸法形状を図2.2-1に示す。加熱能力、実験スペース及び容器の制限から、外径61cm、高さ14.5cmの円形容器を用いた。実験容器の材質はステンレス鋼である。図2.2-1に示すように、実験中は容器底部の温度をK型熱電対により計測した。また、消火挙動確認実験は、燃焼実験室において実施した。燃焼実験室は耐火構造になっており、リチウム燃焼時に生じるエアロゾルを処理するための湿式排煙処理設備（スクラバ）が備えられている。

以下に実験手順を示す。

①リチウムの装填

大気中において、実験容器内に固体のリチウムを装填した。

②リチウムの燃焼処理

図2.2-2に示すように、ガスバーナを用いてリチウムを直接加熱し、リチウムがほぼ全面で燃焼を継続した時点でガスバーナによる加熱を停止した。リチウム燃焼時のエアロゾルは、スクラバにより処理した。

③消火剤の散布

バーナ加熱終了に引き続いて、消火剤を断続的に散布した。消火剤は、燃焼面全体にわたりできるだけ均一な厚さとなるようシャベルや柄杓にて散布した。なお、消火剤は真空容器にて6h以上の乾燥処理を施したもの用いた。

④消火の確認

約100°C（リチウムの凝固点以下）までの消火状況を観察した。また、消火に要した消火剤量を測定した。

2.3 消火性能確認実験方法

(1)実験に用いた消火剤

消火剤の配備量を検討するため、消火挙動確認実験において最も有効と判断された消火剤（1種類）を用いて、リチウム液深及び消火剤散布厚さをパラメータとする消火実験を実施した。

(2)実験方法

表2.3-1に示すように、リチウムの液深を約1cm、約2cm、及び消火剤散布厚さを約0.5cm～約4cmに設定して消火実験を実施した。実験容器の寸法形状を図2.3-1に示す。実験には、外径18.9cm、高さ10cmの平底型の円形容器（材質；ステンレス鋼）を用いた。リチウムの燃焼面積は約270cm²である。図2.3-1に示すように、実験中は実験容器の外壁（液面近傍2点、中間部1点）の温度をR型熱電対により計測した。また、実験は燃焼実験室において実施した。

以下に実験手順を示す。

①リチウムの装填

大気中において、実験容器内に固体のリチウムを装填した。

②リチウムの燃焼処理

図2.3-2に示すように、ガスバーナを用いて実験容器の下部を加熱し、リチウムを燃焼させた。リチウム燃焼時のエアロゾルは、スクラバにより処理した。

③消火剤の散布

リチウムの燃焼が全面で開始した時点でガスバーナによる加熱を停止し、消火剤を断続的に散布した。消火剤は、燃焼面全体にわたりできるだけ均一な厚さとなるよう小型シャベルにて散布した。

④消火の確認

リチウムの凝固温度である179°C以下に達するまでの消火状況を観察した。

3. 実験結果及び検討

3.1 消火挙動確認実験結果

乾燥砂、膨張真珠岩、及びナトレックス L を用いて、リチウムの消火実験を実施した。また、参考として、ナトリウム用消火剤のナトレックス M についても同様な消火実験を実施した。実験結果を表 3.1-1 に示す。

(1)乾燥砂による消火実験結果

乾燥砂での消火実験（以下、「S1 実験」）の状態を図 3.1-1 に示す。燃焼リチウムの炎の高さ（乾燥砂散布前）は 1cm～2cm 程度であり、ナトリウムのそれと比較してほぼ同等である。燃焼リチウムに乾燥砂を散布したところ、散布の初期段階でリチウムとの反応による高さおおよそ 1m の炎が生じた。乾燥砂を計 1540g 敷設し、リチウムの消火を確認した。その後、熱電対の指示値が約 100°C になるまでの状態を観察したが、再発火は生じなかった。

(2)膨張真珠岩による消火実験結果

膨張真珠岩での消火実験（以下、「P1 実験」）の状態を図 3.1-2 に示す。散布直後の膨張真珠岩とリチウムとの反応は、乾燥砂よりも小さく、炎の高さは 0.5m 程度であった。膨張真珠岩の散布途中で散布面に沈み込みによるひび割れが発生し、その部位から再発火が認められた。このため、膨張真珠岩を追加散布し、リチウムを消火させた。消火に要した膨張真珠岩は、計 1000g であった。また、S1 実験と同様に、約 100°C になるまでの状態を観察したが、再発火は認められなかった。

(3)ナトレックス L による消火実験結果

ナトレックス L での消火実験（以下、「L1 実験」）の結果を図 3.1-3 に示す。ナトレックス L では、散布直後におけるリチウムとの反応は、乾燥砂や膨張真珠岩よりも小さく、炎の高さは数 cm 程度であった。散布面の一部にナトレックス L の溶解が生じ、その部位から複数回の局部的な発火（炎の直径 1cm 未満）がみられた。なお、この局部燃焼は直ぐに消え拡大することはなかった。溶解部にナトレックス L を追加散布し、再溶解や局部発火が生じないことを低温（約 100°C）になるまで確認した。ナトレックス L の使用量は、計 728g であった。

(4)ナトレックス M による消火実験結果

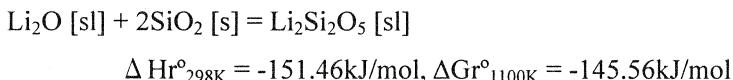
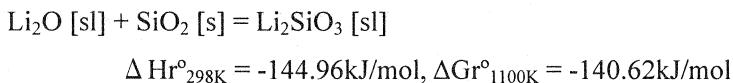
図 3.1-4 は、参考として実施したナトリウム用消火剤のナトレックス M による消火実験（以下、「M1 実験」）の状態である。ナトレックス M では、散布直後のリチウムとの反応は、乾燥砂よりもやや大きく、炎の高さはおおよそ 1.5m であった。また、散布面に溶解部がみられたため、ナトレックス M を追加散布した。ナトレックス M を計 1337g 敷設した後、約 100°C までの状態を観察したところ、消火剤の溶解は生じたものの再発火はみられなかった。

(5) リチウム用消火剤の選定

4種類の消火剤を用いた消火実験におけるリチウム温度の経時変化を図3.1-5～図3.1-8に示す。S1実験、P1実験及びM1実験では、消火剤とリチウムとの反応によって、リチウム温度の上昇がみられた。ナトレックスLを用いたL1実験では、反応による有意な温度変化はみられなかった。また、L1実験では約170°Cでリチウム凝固時の潜熱によると考えられる温度保持挙動が観察されたが、それ以外の実験ではこのような挙動は観察されなかった。これはリチウムと消火剤との反応の有無によるものと推定される。

室温及び消火剤投入前に計測されたリチウム温度（約800°C）におけるO-N-Li系化学ポテンシャル図を図3.1-9及び図3.1-10に示す。室温では、大気雰囲気（窒素約80%、酸素約20%）の窒素・酸素ポテンシャル下におけるリチウムの安定化合物は両者の化合物であるLiNO₃となるが、高温（800°C）ではリチウムの酸化物であるLi₂Oが安定化合物となることが理解できる。

このLi₂Oと乾燥砂及び膨張真珠岩の主要成分であるSiO₂の間には以下の化学反応が生じる。



いずれの反応もいわゆる発熱反応であり、これらの反応は自発的に進むことがわかる。つまり、消火剤投入時に計測された温度上昇は、これらのLiとSiとの複合酸化物の形成反応によるものであると推察される。なお、Li及びLi₂Oは、ナトレックスLの主成分であるNaClとの間で、LiClO₄といった化合物を熱力学的に形成することができない。

以上のように、乾燥砂、膨張真珠岩、ナトレックスMにおいてもリチウムの消火は可能であるが、これらを散布した直後には火炎の発生を伴うリチウムとの反応が観察され、消火という作業を行う上では課題があったのに対し、ナトレックスLの散布では、リチウムとの有意な反応を伴うことなく作業上安全に消火を行うことができると考えられる。

また、ナトレックスLは、ABC消火器と同様に、ボンベ装填タイプのいわゆる消火器型のものも市販されており、取扱い性や保管性の観点からも乾燥砂や膨張真珠岩よりも優位である。

これらのことから、液体リチウム試験ループ用の消火剤としては、ナトレックスLの適用が望ましいと考えられる。

3.2 消火性能確認実験結果

液体リチウム試験ループ用の消火剤としての適用が望ましいと判断したナトレックスL消火剤を用いて、液体リチウム試験ループにおける消火剤の配備量を検討するために、消火性能確認実験を実施した。この結果を表3.2-1に示す。実験容器内のリチウムの液深を約1cm、約2cm、消火剤の散布厚さを約0.5cm～約4cmに設定して、消火実験を実施した。リチウム使用量の計算には、300°C（試験ループの使用温度を考慮）でのリチウムの密度（0.5g/cm³）⁴⁾を、ナトレックスL

消火剤の計算には、カタログ掲載の密度（ 0.8 g/cm^3 ）を用いた。また、消火剤散布開始時の液面近傍の温度（実験容器の正面側と背面側の平均温度）は、約 880°C ～約 960°C であった。実験温度の経時変化については、付録-2 を参照されたい。

(1) 消火実験結果

リチウム液深約 1cm、消火剤散布厚さ約 0.5cm の消火実験（以下「L1-N0.5 実験」）の状態を図 3.2-1 に示す。厚さ約 0.5cm の消火剤を散布したところ、消火剤のリチウム液面下への沈み込みにより、容器壁近傍に燃焼部が残った。燃焼部は、時間の経過とともに拡大したため、消火剤 217g（厚さ 1cm 相当）を追加散布し、リチウムを消火させた。なお、追加散布後に、容器壁近傍の消火剤が溶解し、その部位から局部発火（炎の直径 1cm 未満）がみられたが、燃焼は拡大せず直ぐに消えた。その後、リチウムの凝固点以下の温度になるまでの状態を観察したが、リチウムの燃焼が再開することはなかった。

図 3.2-2 は、リチウム液深約 2cm、消火剤散布厚さ約 2cm の消火実験（以下「L2-N2 実験」）の状態を示したものである。L1-N0.5 実験と同様に、1 回目の消火剤（厚さ約 2cm）散布では、消火剤のリチウム中への沈み込みにより燃焼部が残存し、拡大する傾向がみられた。このため、消火剤 217g（厚さ 1cm 相当）の追加散布によりリチウムを消火させた。L2-N2 実験では、追加散布した消火剤の溶解による局部発火は認められなかった。

リチウム液深約 1cm において、消火剤散布厚さ約 1cm、約 2cm 及び約 3cm の条件での実験状態を図 3.2-3～図 3.2-5 に、リチウム液深約 2cm において、消火剤散布厚さ約 3cm、約 4cm の実験状態を図 3.2-6、図 3.2-7 に示す。いずれも 1 回目の消火剤散布で消火することができた。なお、図 3.2-6 に示すような消火剤の溶解による一時的な局部発火がいずれの条件においてもみられたが、燃焼が再開することではなく、リチウムの凝固に至った。

(2) リチウム液深と消火剤散布厚さとの関係

リチウムの液深とナトレックス L 消火剤の散布厚さとの関係を図 3.2-8 に示す。ナトレックス L の消火に必要な消火剤の厚さは、リチウム液深が大きくなるにつれて厚くなる傾向がある。これは、リチウムとナトレックス L との比重の違いによるものであると考えられ、リチウム液深 1cm では消火剤散布厚さ 1cm 以上で、液深 2cm では散布厚さ 3cm 以上でリチウムを消火することができることがわかった。以上から、本実験（リチウム液深 2cm 以内）の範囲では、液深の 1.5 倍の厚さの消火剤を散布することにより、リチウムの消火が可能と考えられる。

本実験では、消火剤散布後の燃焼部の残存や消火剤の溶解は、主に容器壁近傍で認められた。これは、ガスバーナで実験容器を加熱しリチウムを燃焼させたため、容器からの熱的な影響によるものと考えられる。液体リチウム試験ループで想定されるリチウム漏えい部位（床ライニング等）は低温であることから、本消火実験は実機よりも熱的に厳しい条件になっているものと推察される。

3.3 液体リチウム試験ループにおける漏えい燃焼リチウムの消火に対する提案

3.2 節第 2 項で述べたとおり、ナトレックス L の散布厚さは燃焼リチウムの液深に依存すること

がわかった。これは、ナトレックスLの見かけの比重（約0.8）よりもリチウムのそれ（約0.5）が小さいために、一部が燃焼リチウム中に沈み込むためと思われる。

液体リチウム試験ループの設計・製作にあたっては、この消火特性を考慮しつつ、漏えい燃焼したリチウムを確実に消火できるよう設備対応しておくことが必要となる。

この設備対応の一例を図3.3-1に示し、その概念を以下に記す。

- ・漏えいしたリチウムの広がり防止及び消火剤による人的消火の可能範囲を考慮して、床ライナにはある面積（範囲）毎に堰を設ける。
- ・各区画には漏えいリチウム回収用の配管を設け、消火剤散布による消火に耐えられない程度のリチウム漏えいが生じた場合には同配管を通って漏えいリチウム回収容器に移送する。なお、この床ライナ上の漏えい回収用配管口の高さは、消火性能確認実験結果を踏まえて数cm以下にする。
- ・漏えいリチウム回収容器には、不活性ガス（Ar）ブローラインを設け、回収したリチウムを窒息（消火）する。
- ・小規模なリチウム漏えい燃焼においては、漏えい区画内で消火剤散布による消火を行う。

4. 結言

EVEDA のターゲット系の設計・実証に反映するための液体リチウム試験ループを建設するに当たり、燃焼リチウムに対する各種消火剤の消火挙動を実験により確認し、液体リチウム試験ループに適した消火剤を選定するとともに、その配備量の決定に向けた消火性能について実験により評価を行った。

得られた成果の概要は、以下のとおりである。

- (1)乾燥砂、膨張真珠岩及びナトレックス L を用いて、リチウム火災時の消火挙動確認実験を実施した。各消火剤の消火実験に使用したリチウム量は約 250g である。実験の結果、ナトレックス L が最も優れた消火特性を有していた。また、取扱い性及び保管性の面からも試験ループ用消火剤として、ナトレックス L が適していると考えられる。
- (2)リチウム燃焼面積約 270cm²、及びリチウム液深約 1cm、約 2cm の条件において、ナトレックス L 消火剤による消火性能確認実験を実施した。その結果、リチウム液深の 1.5 倍の厚さの消火剤を散布することにより、リチウムの消火が可能であることを確認した。

謝辞

消火実験においては、常陽産業株式会社の郡司 茂氏、及び日本原子力研究開発機構 技術開発部の所 大志郎氏の多大な協力を得た。ここに深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 幅広いアプローチ (Broader Approach) へようこそ (日本原子力研究開発機構 那珂核融合研究所 核融合研究開発部門ホームページ) : available from <<http://www.naka.jaea.go.jp/BA/>> (accessed 2009-10-05).
- 2) 理化学辞典第 3 版、岩波書店 (1971)
- 3) ナトリウム教育委員会、ナトリウム技術読本、JNC TN9410 2005-011 (2005)
- 4) 浅田 隆、他、リチウムの性質とその取扱い、JNC TN9410 2000-013 (2000)

表 2.1-1 リチウム及びナトリウムの主な特性^{2), 3)}

	リチウム	ナトリウム
消防法	第3類危険物 (指定数量50kg)	第3類危険物 (指定数量10kg)
融点(°C)	179	98
沸点(°C)	1317	881
密度(g/cm ³)	0.53(20°C)	0.97(20°C)

表 2.2-1 消火挙動確認実験の条件

実験No.	消火剤 の種類	リチウム 使用量	実験容器の形状	加熱方式
S1	乾燥砂	250g	円形容器 (外径61cm、 高さ14.5cm、 板厚0.6cm)	ガスバーナ
P1	膨張真珠岩	250g		
L1	ナトレックスL	250g		
M1	ナトレックスM	250g		

表 2.3-1 消火性能確認実験の条件

実験No.	リチウム 液深	消火剤 散布厚さ	実験容器の形状	加熱方式
L1-N0.5	1cm	0.5cm	平底型円形容器 (外径18.9cm、 高さ10cm、 板厚0.15cm)	ガスバーナ
L1-N1	1cm	1cm		
L1-N2	1cm	2cm		
L1-N3	1cm	3cm		
L2-N2	2cm	2cm		
L2-N3	2cm	3cm		
L2-N4	2cm	4cm		

表 3.1-1 消火挙動確認実験結果

実験No.	リチウム 使用量 (g)	リチウム 燃焼面積 (cm ²)	消火剤 の種類	消火剤 使用量 (g)	加熱開始～消 火剤散布開始 までの時間 (min)	消火剤散布時 液中温度 (°C)	消火状況	消火剤散布の 初期に生じる 炎の大きさ
S1	250	約400	乾燥砂	1540	7.5	973	※1	消火 (炎の高さ:おおよそ1m) 大
P1	247	約400	膨張真珠岩	1000	7.3	752	消火	中 (炎の高さ:おおよそ0.5m)
L1	251	約400	ナトレックスL	728	6.1	815	消火	小 (炎の高さ:数cm)
M1	250	約400	ナトレックスM	1337	6.1	784	消火	大 (炎の高さ:おおよそ1.5m)

※1 実験No.S1は、リチウム液面近傍部での熱電対シース部の損傷により、素線の短絡が生じ液面近傍の温度計測となつた。

表 3.2-1 消火性能確認実験結果

実験No.	リチウム液深(cm)	リチウム使用量(g)	リチウム燃焼面積(cm ²)	ナトックスL散布厚さ(cm)	ナトックスL使用量※2(g)	加熱開始～消火剤散布開始までの時間(min)	消火剤散布開始時液面近傍温度※3(°C)	消火状況	備考
L1-N0.5	約1	136	約270	約0.5	109	4.5	957	燃焼部残存	消火剤217gを追加散布し、消火した。
L1-N1	約1	136	約270	約1	217	4.9	944	消火	
L1-N2	約1	136	約270	約2	435	4.7	891	消火	
L1-N3	約1	136	約270	約3	652	5.1	938	消火	
L2-N2	約2	271	約270	約2	435	7.6	933	燃焼部残存	消火剤217gを追加散布し、消火した。
L2-N3	約2	271	約270	約3	652	8.3	882	消火	
L2-N4	約2	271	約270	約4	870	7.1	960	消火	

※1 リチウム使用量の計算は、300°C(試験ループの使用温度)でのリチウムの密度(0.5g/cm³)を用いた。

※2 ナトックスL使用量の計算は、カタログの密度(0.8g/cm³)を用いた。

※3 消火剤散布時における実験容器の液面近傍温度(正面側と背面側の平均値)である。

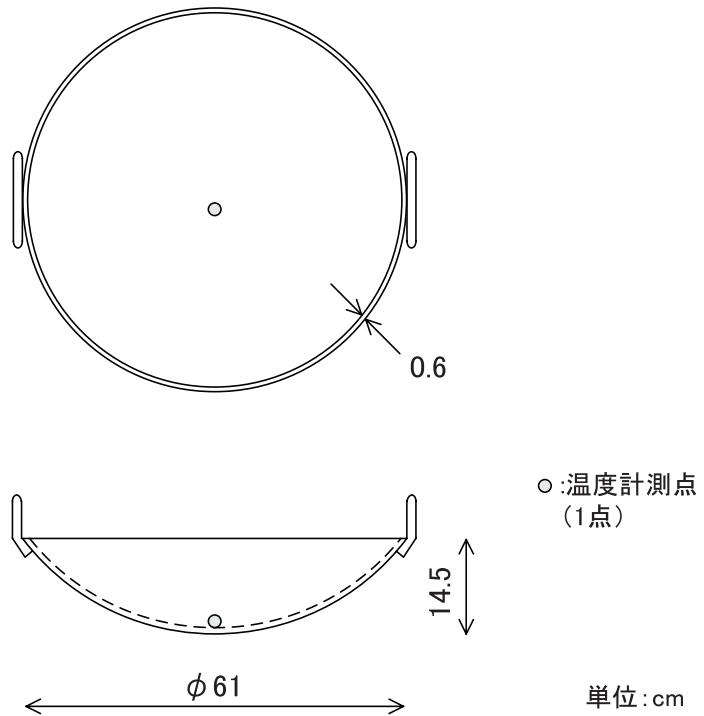


図 2.2-1 消火挙動確認実験に用いた容器の形状

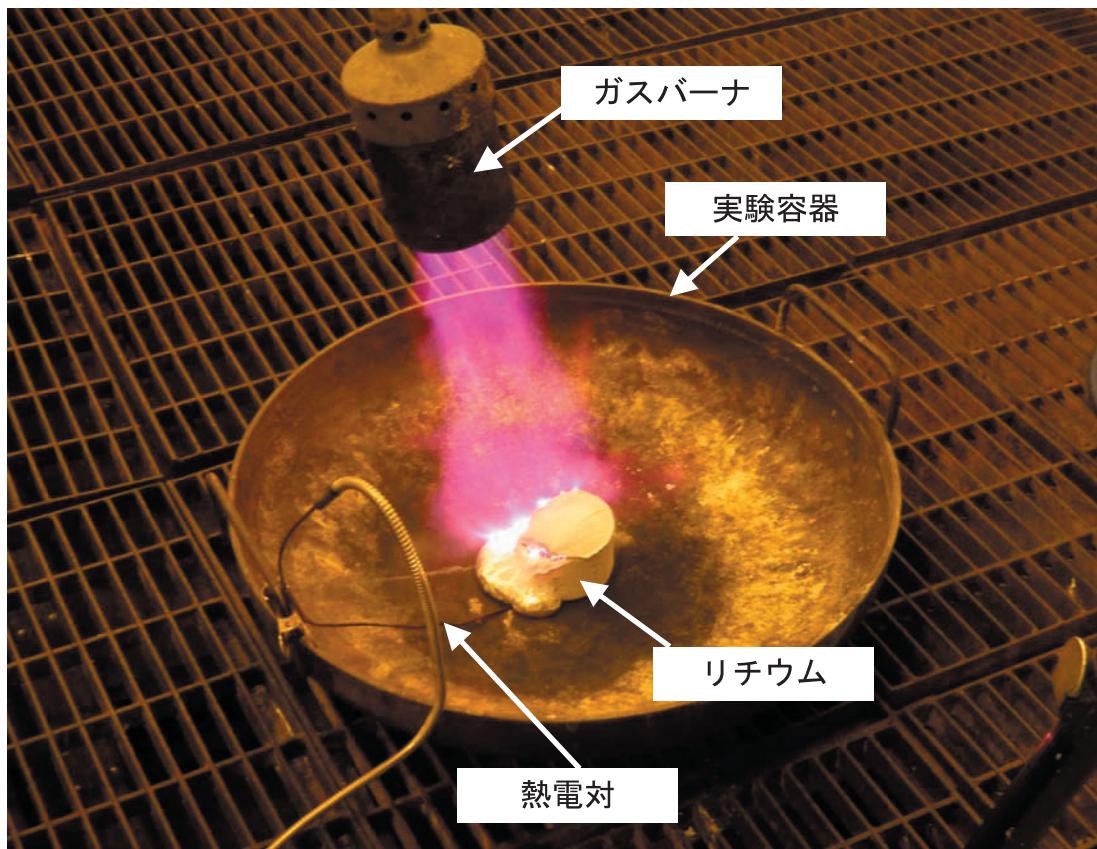


図 2.2-2 消火挙動確認実験におけるリチウムの燃焼処理状況

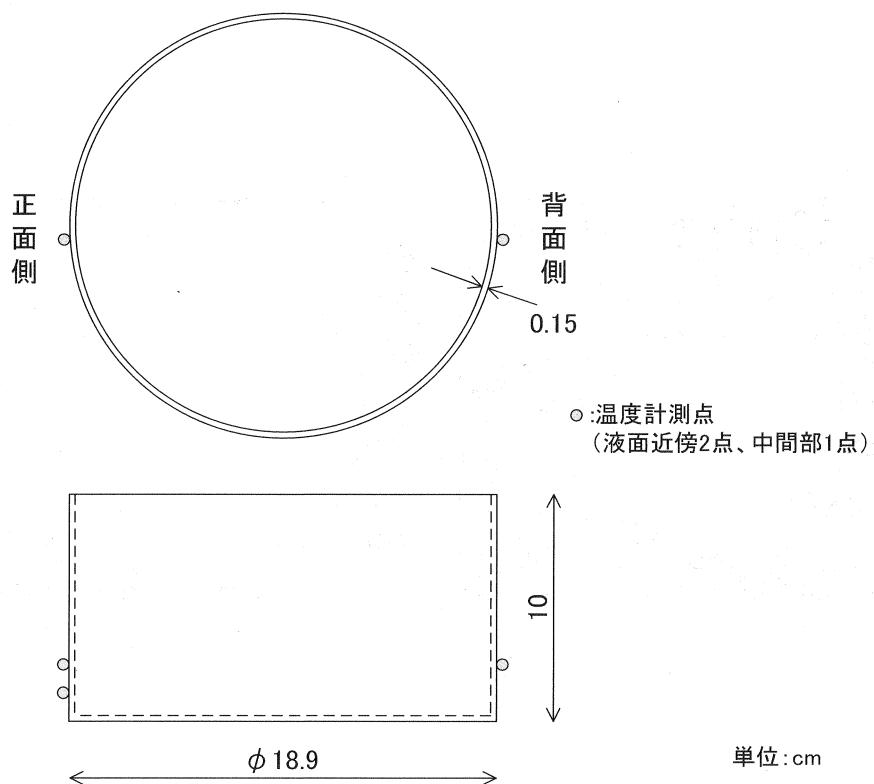


図 2.3-1 消火性能確認実験に用いた容器の形状

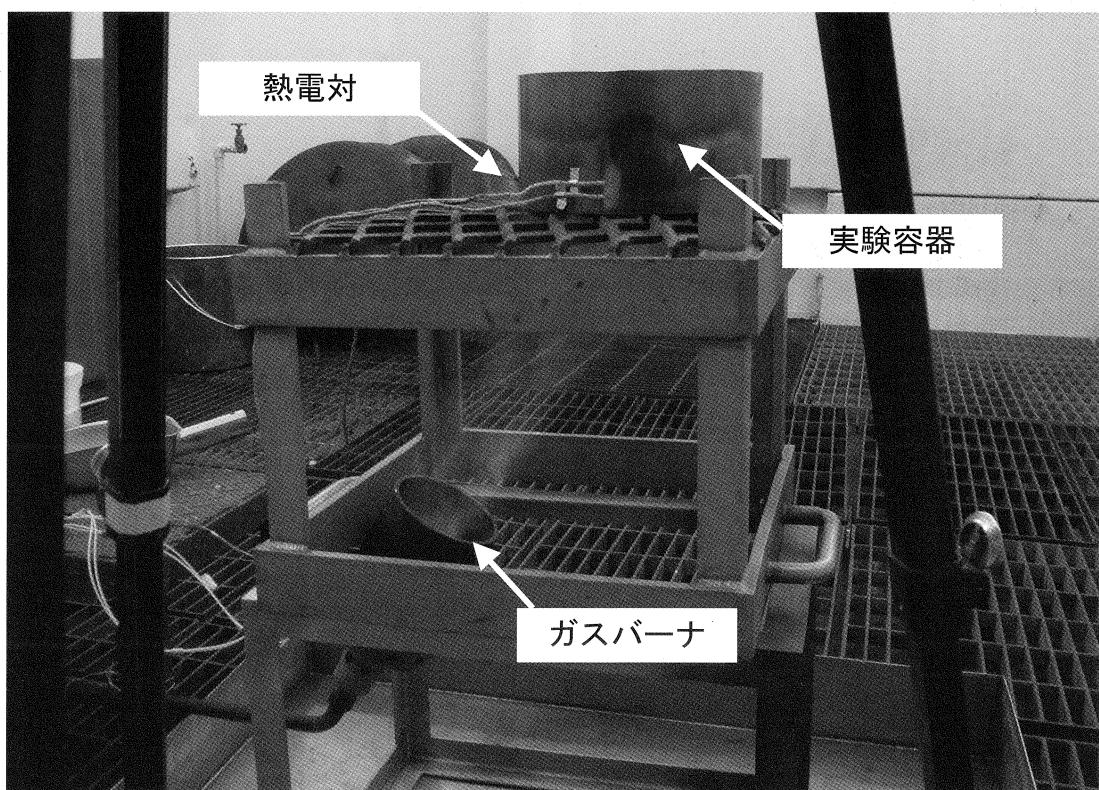


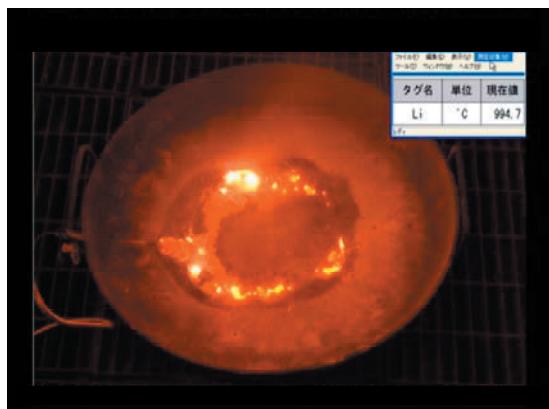
図 2.3-2 消火性能確認実験におけるリチウムの燃焼処理状況



(1)リチウム燃焼(消火剤散布直前)



(2)消火剤散布の初期



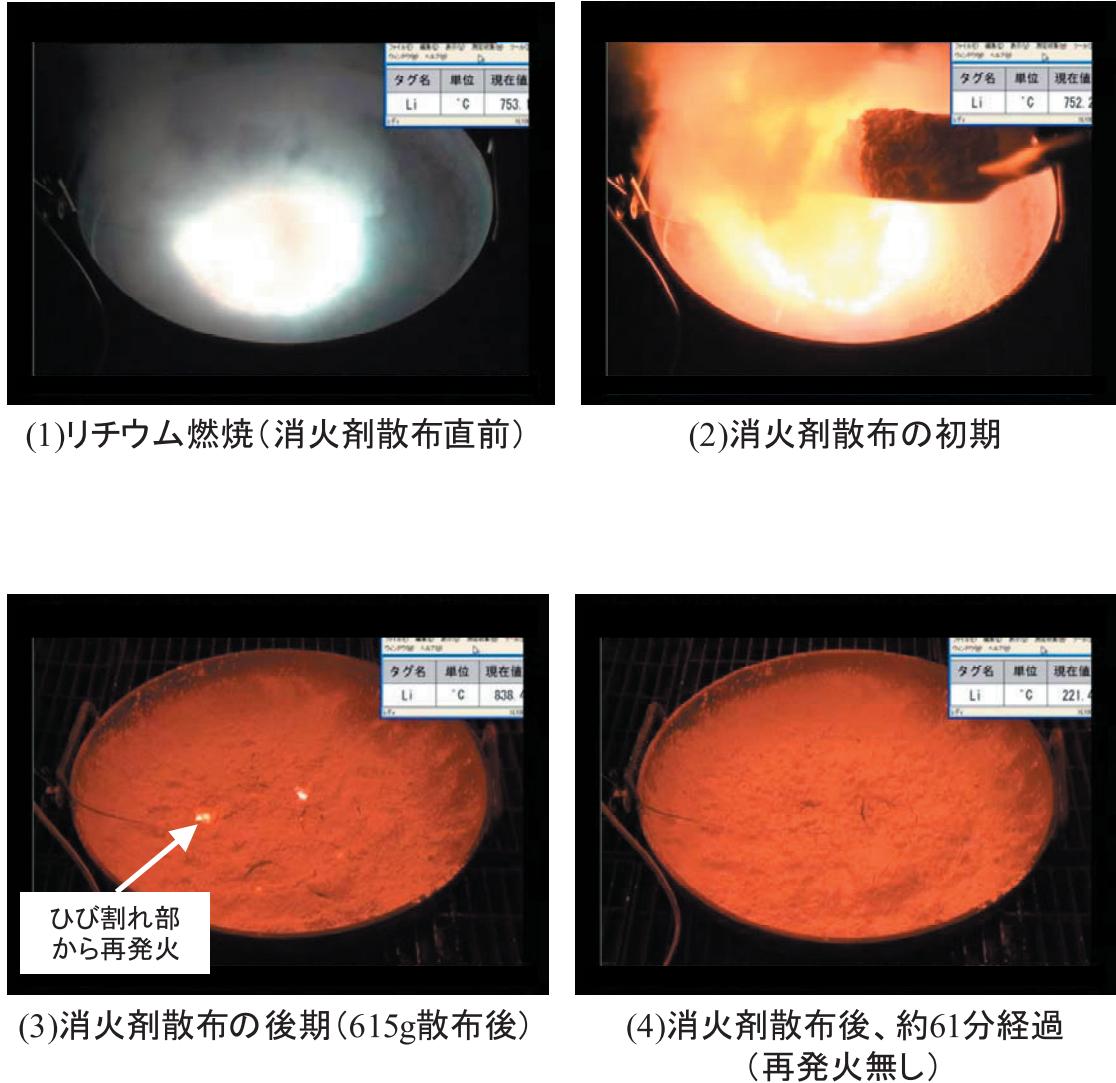
(3)消火剤散布の後期(1179g散布後)



(4)消火剤散布後、約54分経過
(再発火無し)

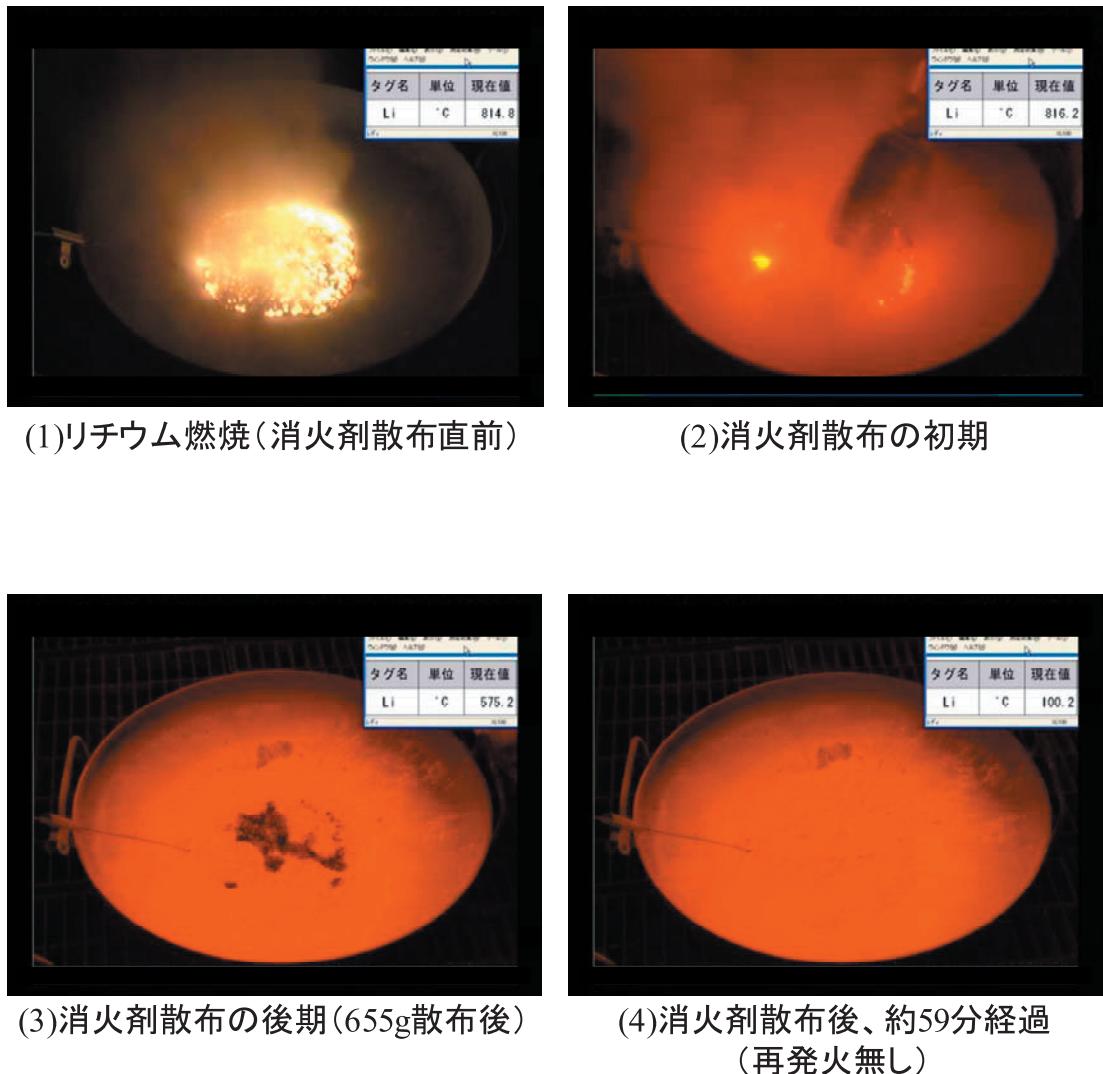
実験No.: S1
リチウム使用量: 250g
消火剤の種類: 乾燥砂
消火剤の使用量: 1540g

図 3.1-1 消火挙動確認実験（実験 No.S1）の状態



実験No.: P1
リチウム使用量: 247g
消火剤の種類: 膨張真珠岩
消火剤の使用量: 1000g

図 3.1-2 消火挙動確認実験（実験 No.P1）の状態



実験No.: L1
リチウム使用量: 251g
消火剤の種類: ナトレックスL
消火剤の使用量: 728g

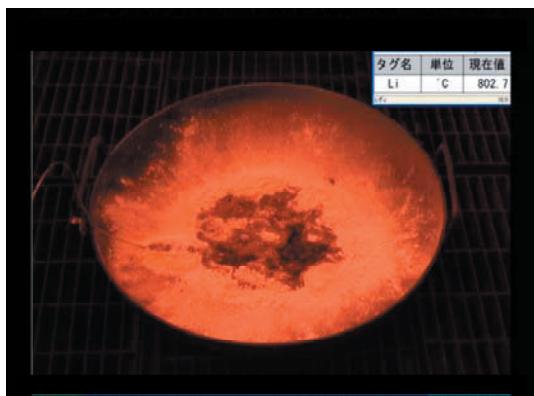
図 3.1-3 消火挙動確認実験（実験 No.L1）の状態



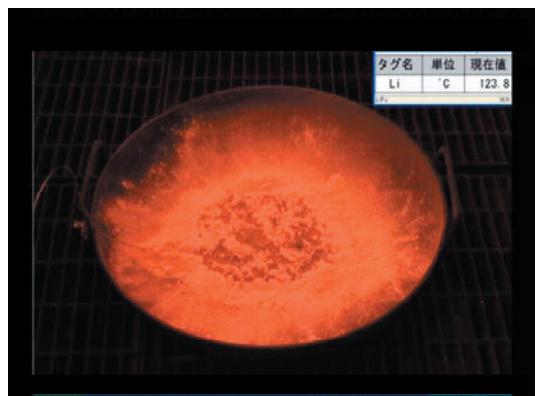
(1)リチウム燃焼(消火剤散布直前)



(2)消火剤散布の初期



(3)消火剤散布の後期(1152g散布後)



(4)消火剤散布後、約69分経過
(再発火無し)

実験No.: M1
リチウム使用量: 250g
消火剤の種類: ナトレックスM
消火剤の使用量: 1337g

図 3.1-4 消火挙動確認実験（実験 No.M1）の状態

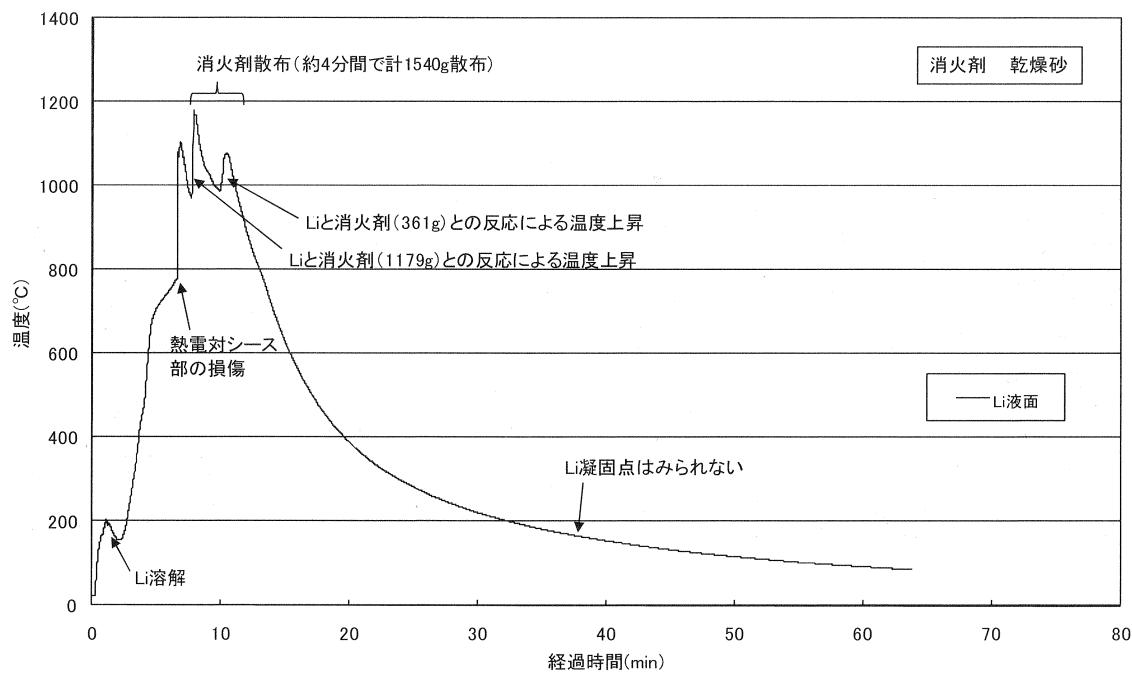


図 3.1-5 消火挙動確認実験（実験 No.S1）の温度変化

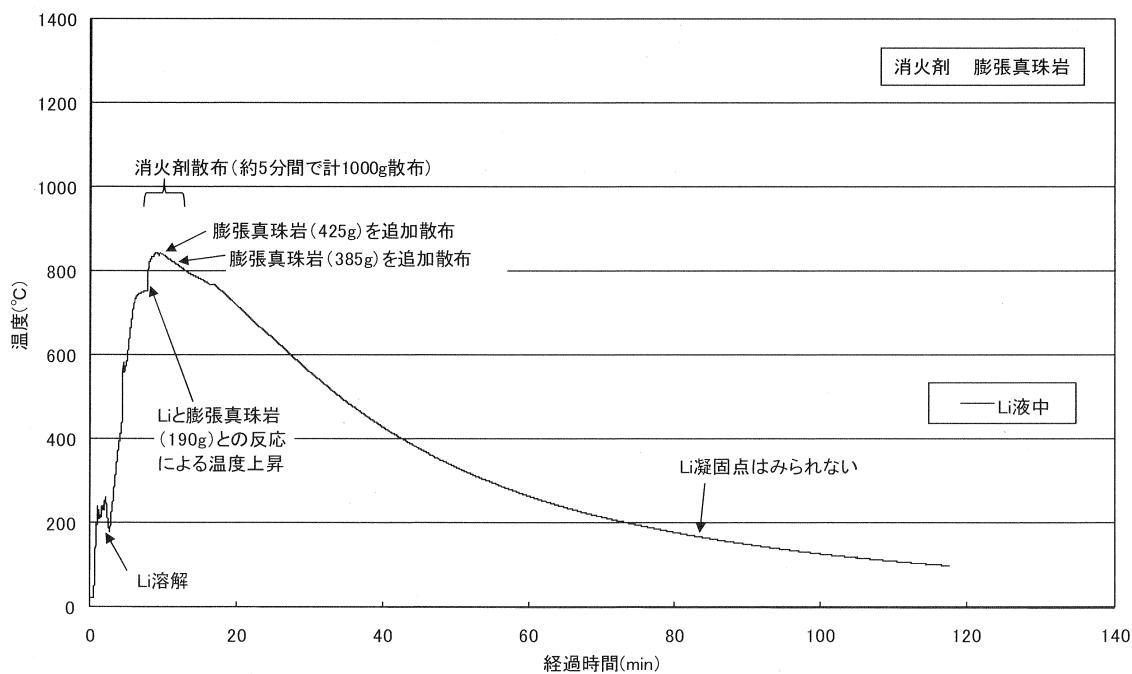


図 3.1-6 消火挙動確認実験（実験 No.P1）の温度変化

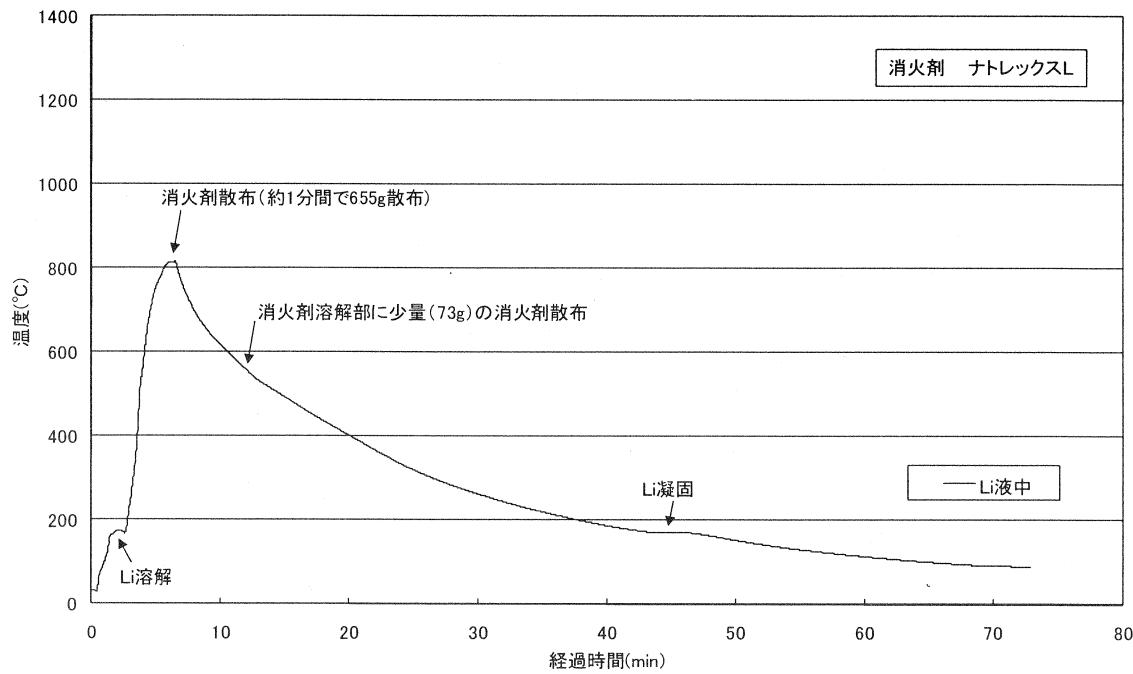


図 3.1-7 消火挙動確認実験（実験 No.L1）の温度変化

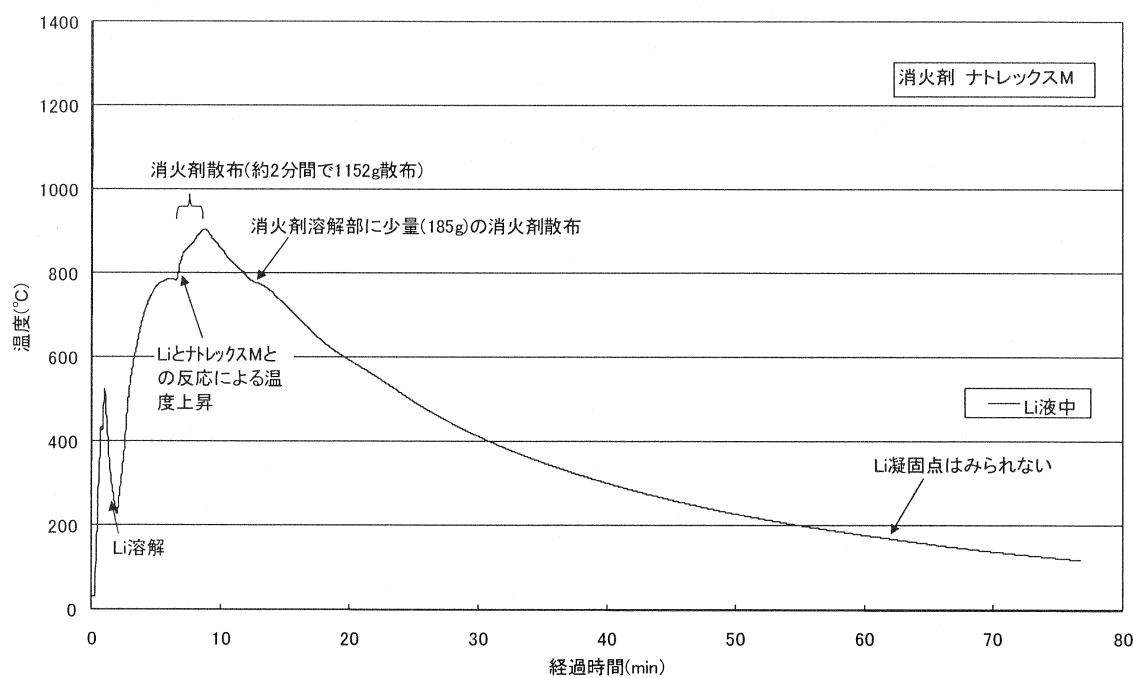


図 3.1-8 消火挙動確認実験（実験 No.M1）の温度変化

The O - N - Li system at $P = 1.0$ atm; $T = 298.15$ K

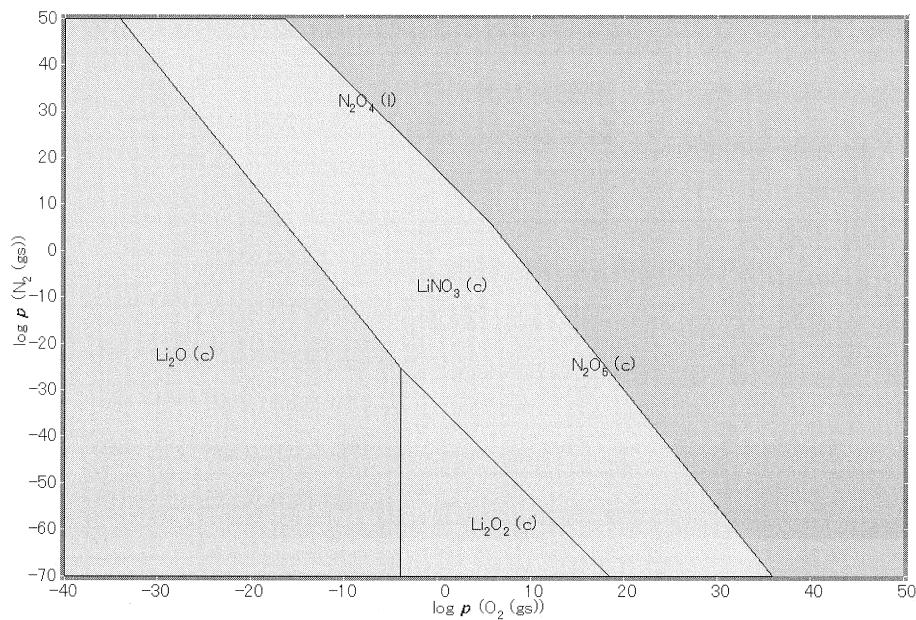


図 3.1-9 室温 (298.15K) における O-N-Li 系化学ボテンシャル図

The O - N - Li system at $P = 1.0$ atm; $T = 1073.15$ K

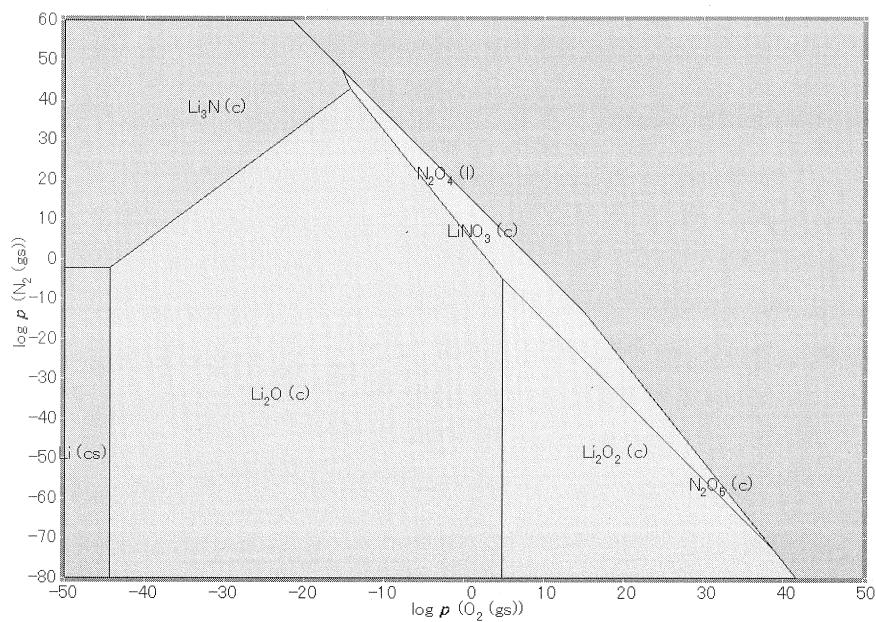
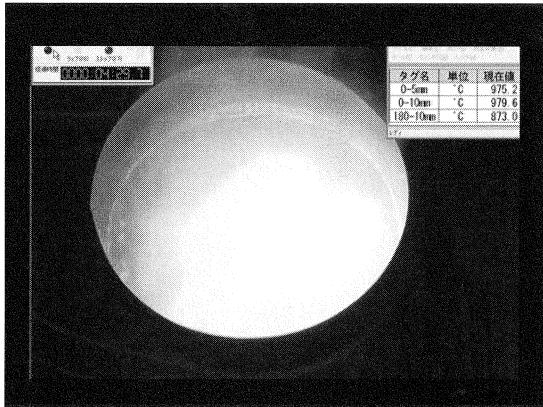
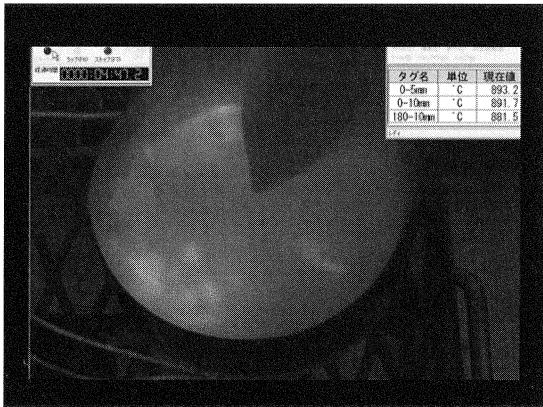


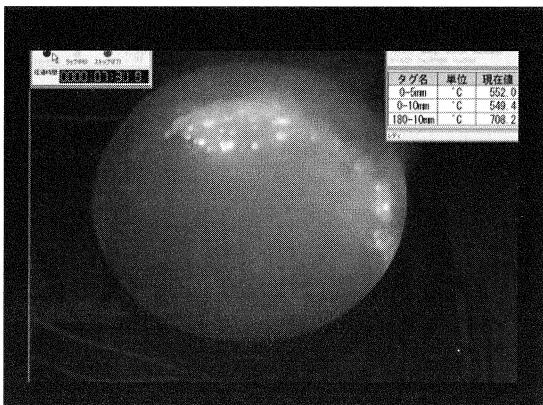
図 3.1-10 800°C (1073.15K) における O-N-Li 系化学ボテンシャル図



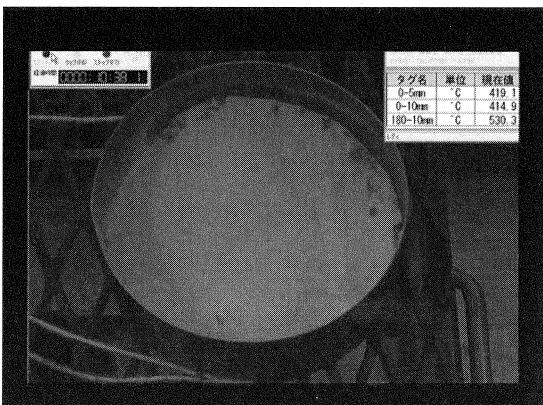
(1)リチウム燃焼(消火剤散布直前)



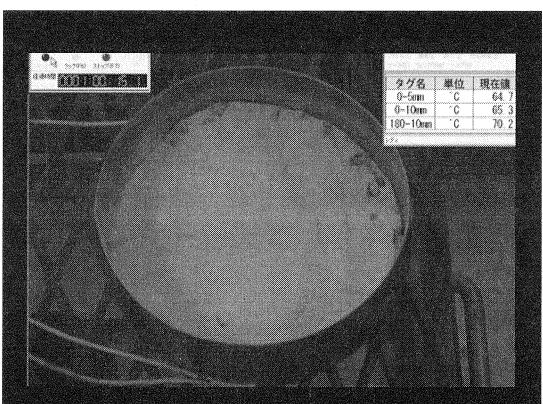
(2)消火剤(厚さ約0.5cm)散布



(3)消火剤散布後(燃焼部の残存有り)



(4)消火剤追加散布後

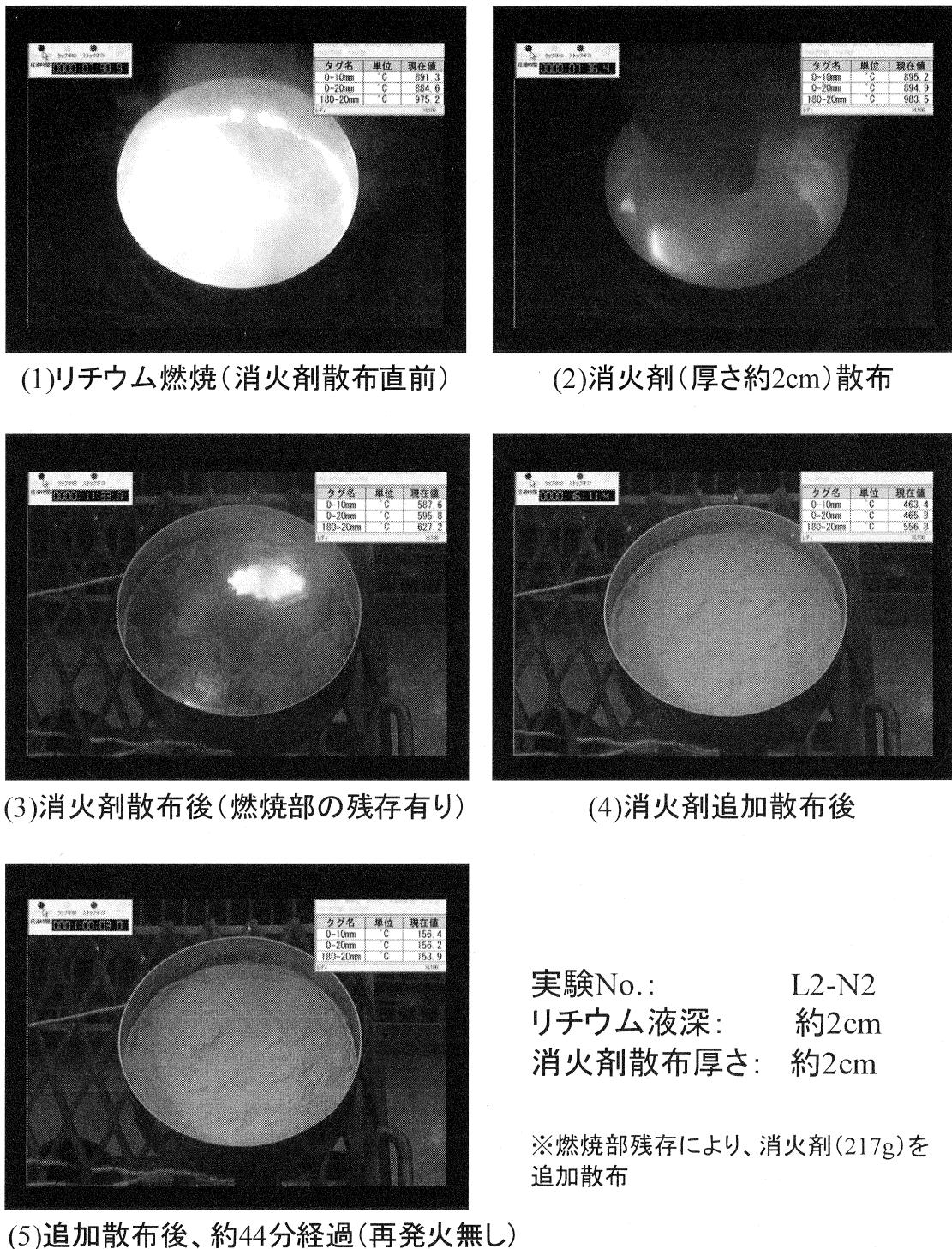


(5)追加散布後、約53分経過(再発火無し)

実験No.: L1-N0.5
 リチウム液深: 約1cm
 消火剤散布厚さ: 約0.5cm

※燃焼部残存により、消火剤(217g)を追加散布

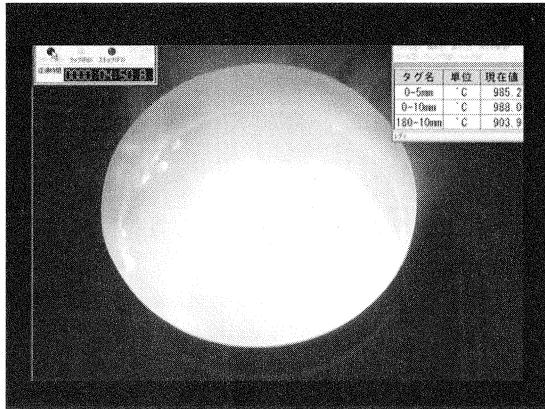
図 3.2-1 消火性能確認実験（実験 No.L1-N0.5）の状態



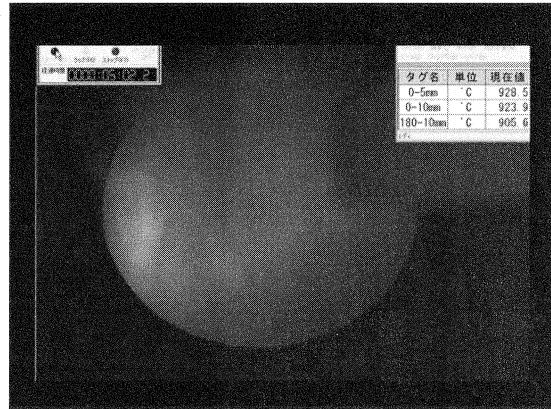
実験No.: L2-N2
 リチウム液深: 約2cm
 消火剤散布厚さ: 約2cm

※燃焼部残存により、消火剤(217g)を追加散布

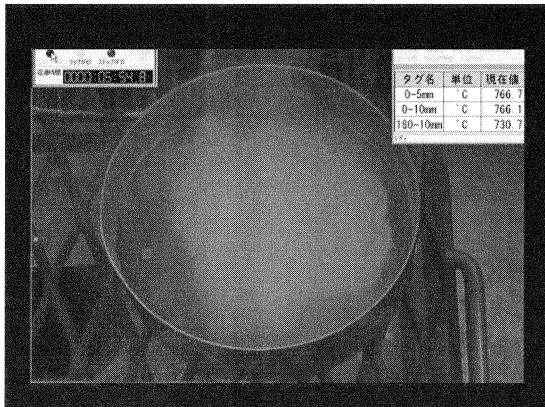
図 3.2-2 消火性能確認実験（実験 No.L2-N2）の状態



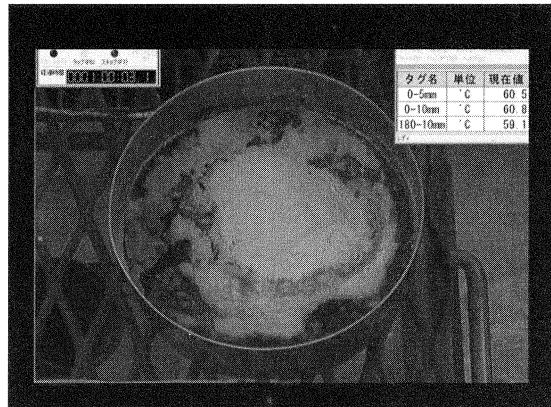
(1)リチウム燃焼(消火剤散布直前)



(2)消火剤(厚さ約1cm)散布



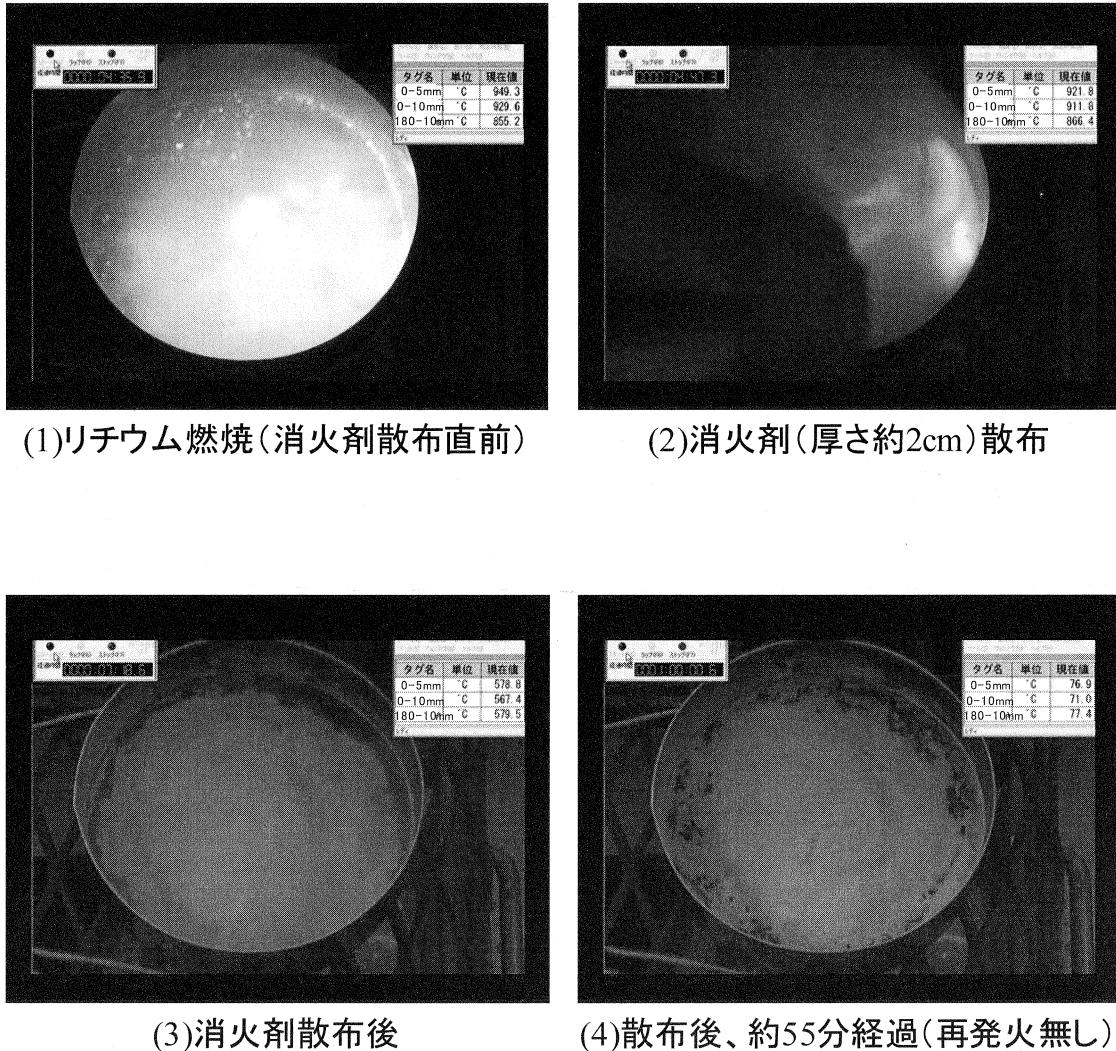
(3)消火剤散布後



(4)散布後、約55分経過(再発火無し)

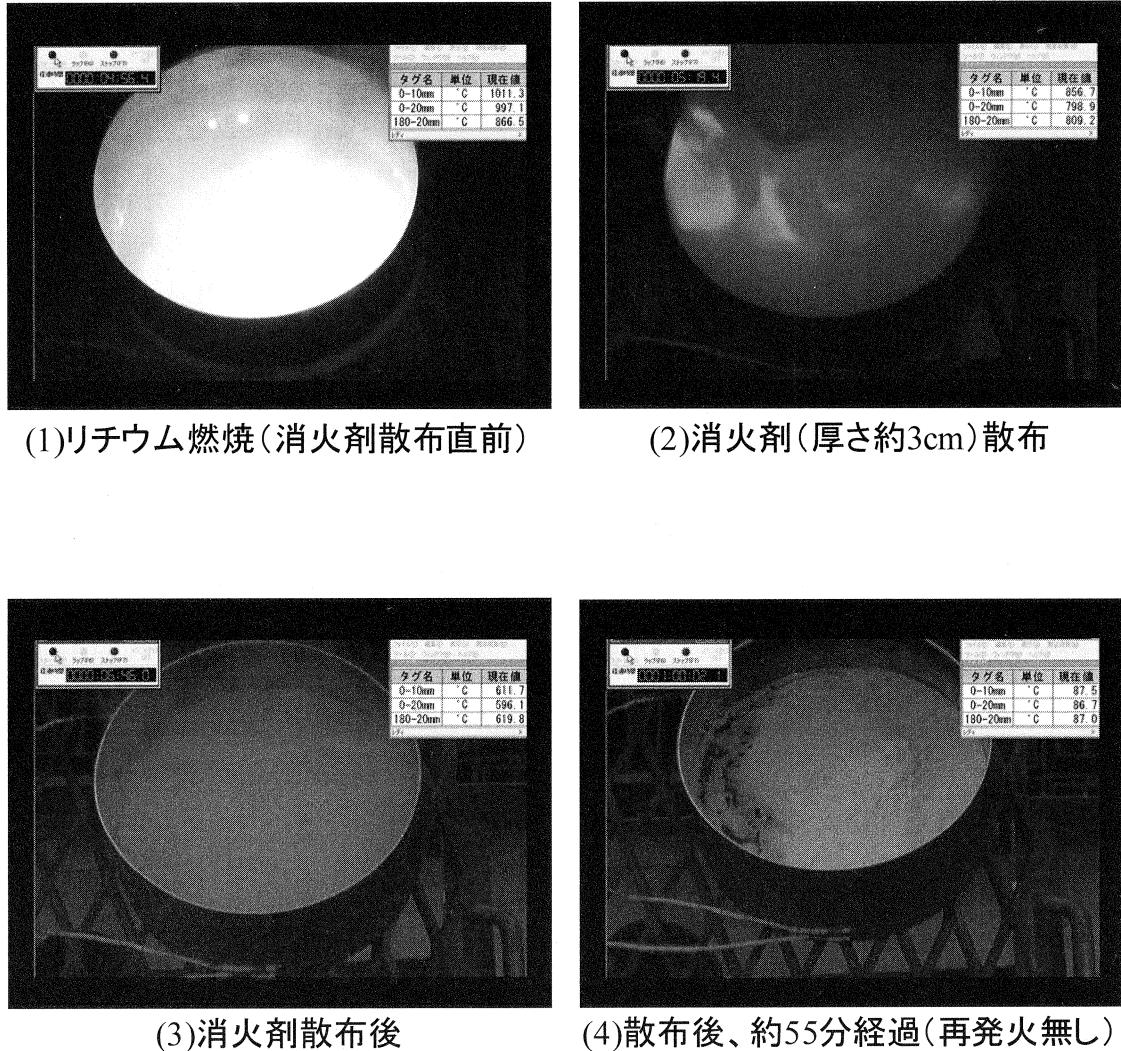
実験No.: L1-N1
 リチウム液深: 約1cm
 消火剤散布厚さ: 約1cm

図 3.2-3 消火性能確認実験（実験 No.L1-N1）の状態



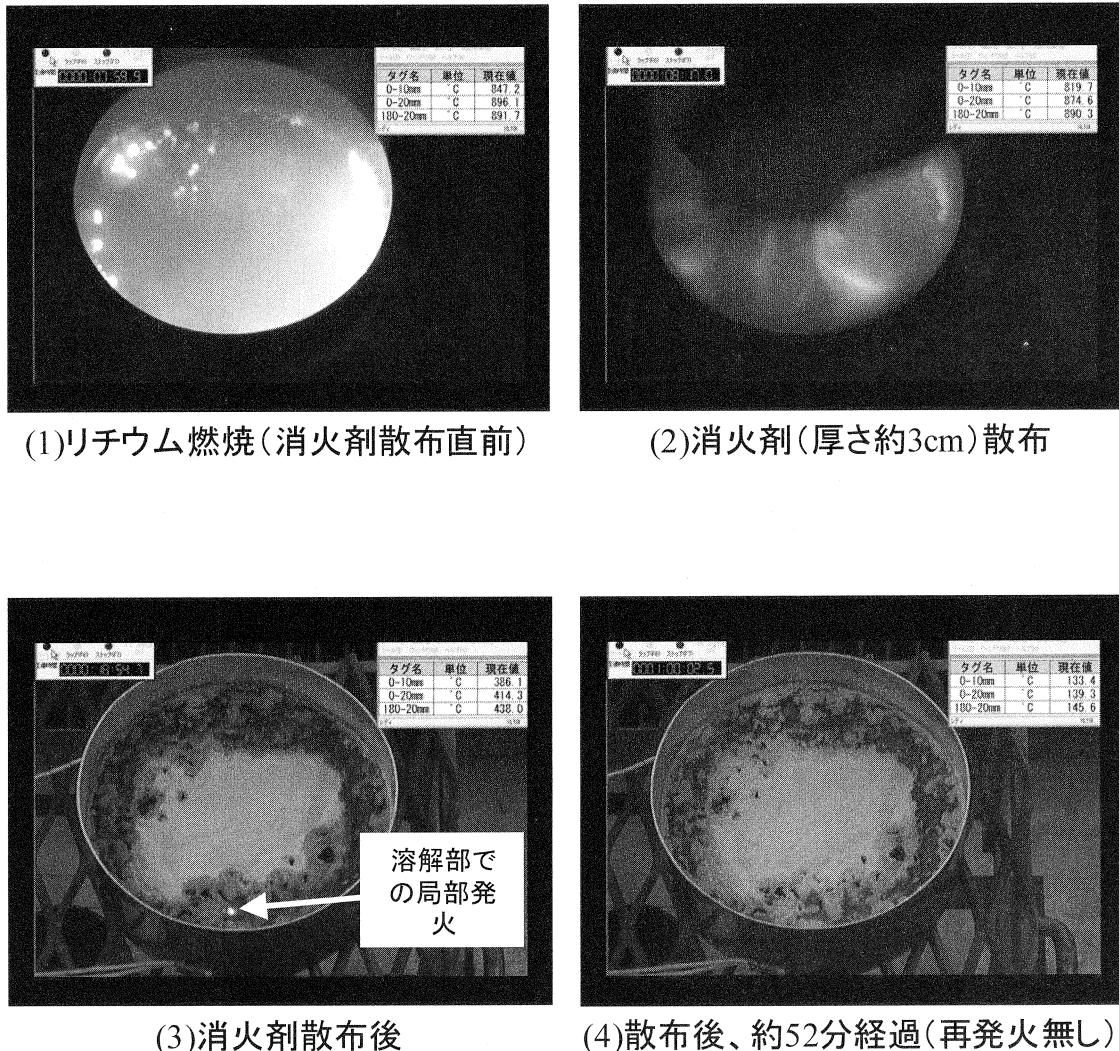
実験No.: L1-N2
 リチウム液深: 約1cm
 消火剤散布厚さ: 約2cm

図 3.2-4 消火性能確認実験（実験 No.L1-N2）の状態



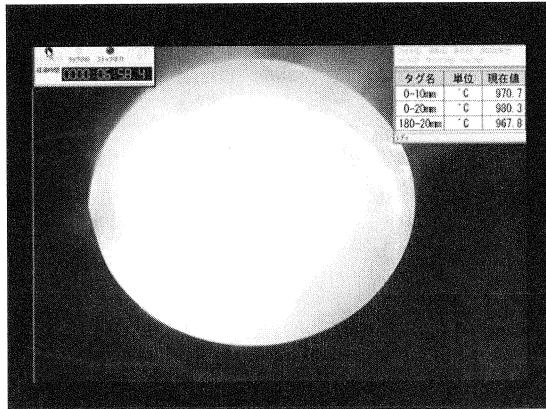
実験No.: L1-N3
 リチウム液深: 約1cm
 消火剤散布厚さ: 約3cm

図 3.2-5 消火性能確認実験（実験 No.L1-N3）の状態

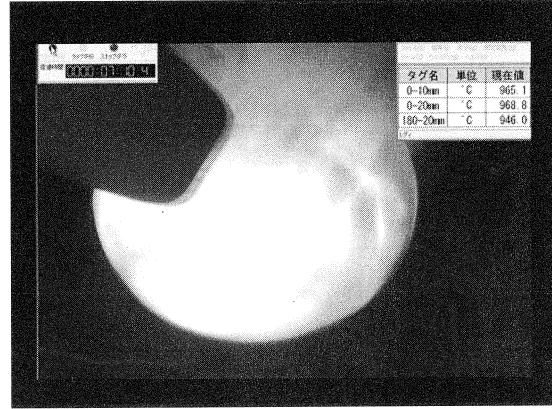


実験No.: L2-N3
 リチウム液深: 約2cm
 消火剤散布厚さ: 約3cm

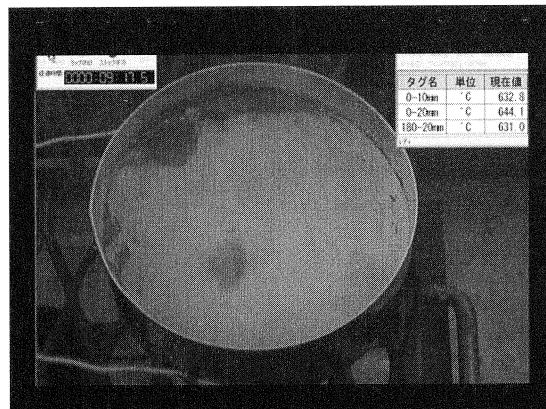
図 3.2-6 消火性能確認実験（実験 No.L2-N3）の状態



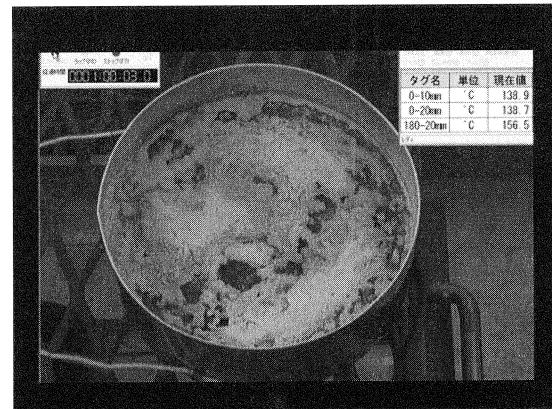
(1)リチウム燃焼(消火剤散布直前)



(2)消火剤(厚さ約4cm)散布



(3)消火剤散布後



(4)散布後、約53分経過(再発火無し)

実験No.: L2-N4
 リチウム液深: 約2cm
 消火剤散布厚さ: 約4cm

図 3.2-7 消火性能確認実験（実験 No.L2-N4）の状態

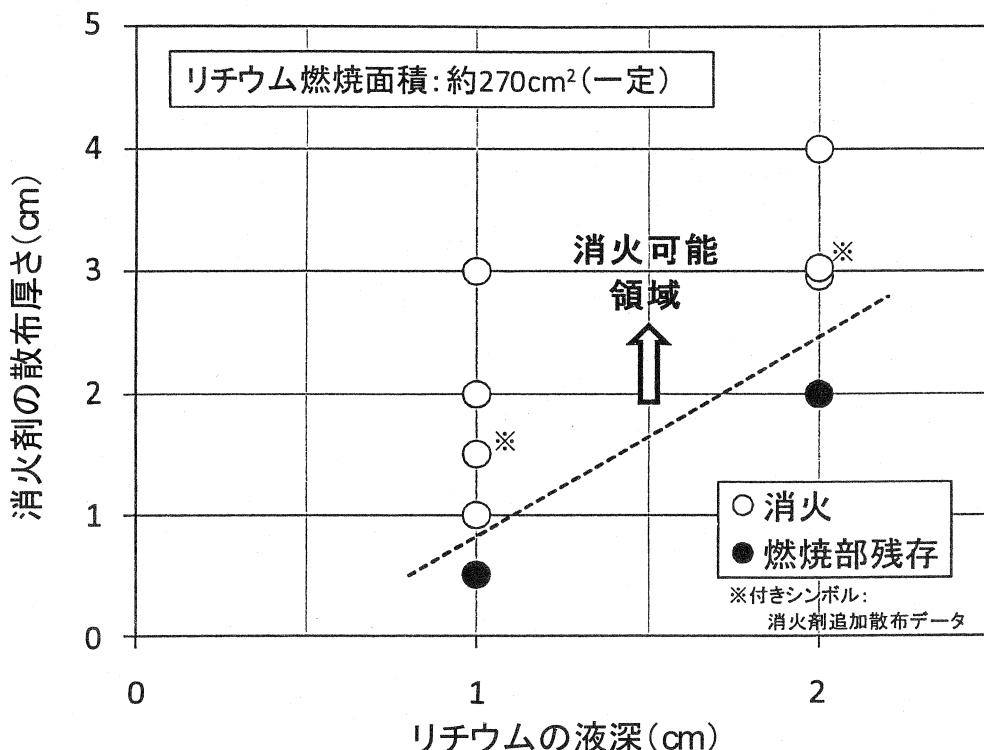


図 3.2-8 リチウム液深と消火剤散布厚さとの関係

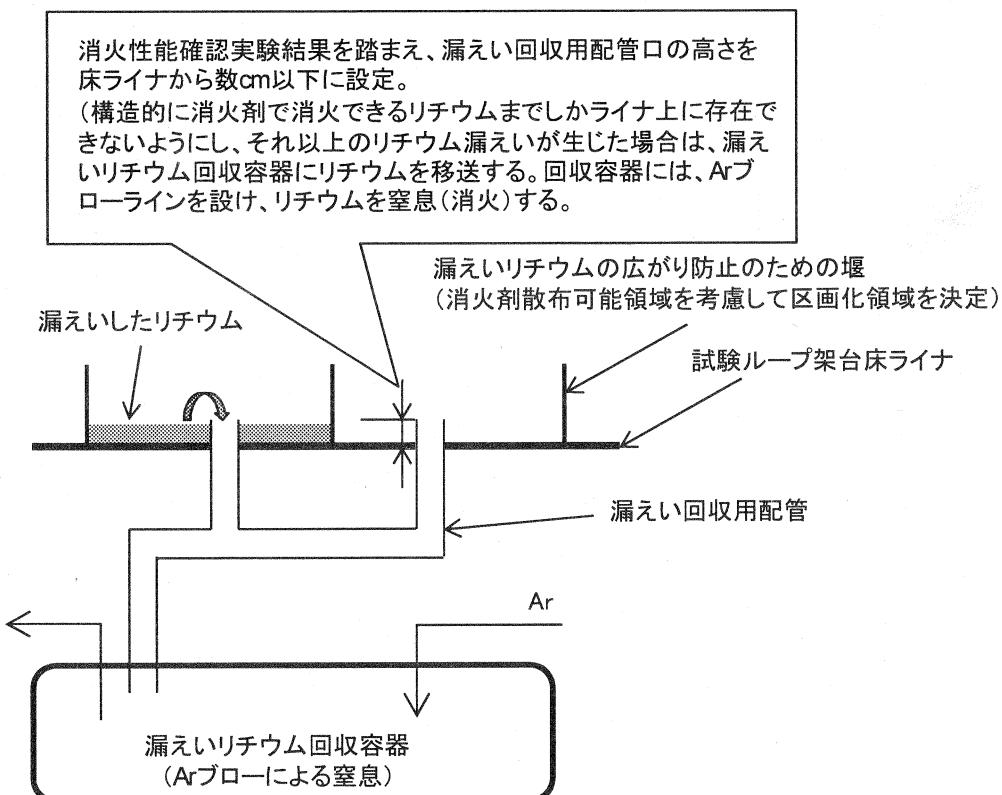


図 3.3-1 リチウム取扱施設におけるリチウム消火設備対応（例）

付 錄

This is a blank page.

付録-1

消火剤の化学成分等

This is a blank page.

付録-1(a) 乾燥砂の化学成分等

新潟日本油設株式会社	品名：乾燥砂	項目：試験成績表																											
1) 品名：乾燥砂（水洗い・選別篩い工程品）																													
2) 産地：新潟県胎内市																													
3) 鉱物分析（成分分析）表																													
<table border="1"> <thead> <tr> <th>記号</th> <th>成分名称</th> <th>含有率 (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>S i O²</td> <td>珪酸</td> <td>87.16</td> </tr> <tr> <td>A l²O₃</td> <td>アルミナ</td> <td>4.31</td> </tr> <tr> <td>F e²O₃</td> <td>酸化鉄</td> <td>1.97</td> </tr> <tr> <td>C a O</td> <td>石灰</td> <td>0.13</td> </tr> <tr> <td>N a²O</td> <td>酸化ナトリウム</td> <td>0.84</td> </tr> <tr> <td>K²O</td> <td>酸化カリ</td> <td>3.90</td> </tr> <tr> <td>T i O²</td> <td>酸化チタン</td> <td>0.50</td> </tr> </tbody> </table>			記号	成分名称	含有率 (%)	S i O ²	珪酸	87.16	A l ² O ₃	アルミナ	4.31	F e ² O ₃	酸化鉄	1.97	C a O	石灰	0.13	N a ² O	酸化ナトリウム	0.84	K ² O	酸化カリ	3.90	T i O ²	酸化チタン	0.50			
記号	成分名称	含有率 (%)																											
S i O ²	珪酸	87.16																											
A l ² O ₃	アルミナ	4.31																											
F e ² O ₃	酸化鉄	1.97																											
C a O	石灰	0.13																											
N a ² O	酸化ナトリウム	0.84																											
K ² O	酸化カリ	3.90																											
T i O ²	酸化チタン	0.50																											
4) 粒度分布表（篩い選別試験）																													
<table border="1"> <thead> <tr> <th>篩目寸法 (mm)</th> <th>残留量 (g)</th> <th>通過率 (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.85</td> <td>1.25</td> <td>98.75</td> </tr> <tr> <td>0.71</td> <td>6.25</td> <td>92.50</td> </tr> <tr> <td>0.60</td> <td>25.00</td> <td>67.50</td> </tr> <tr> <td>0.50</td> <td>25.00</td> <td>42.50</td> </tr> <tr> <td>0.42</td> <td>26.50</td> <td>16.00</td> </tr> <tr> <td>0.35</td> <td>9.50</td> <td>6.50</td> </tr> <tr> <td>0.30</td> <td>6.00</td> <td>0.50</td> </tr> <tr> <td>以下</td> <td>0.50</td> <td>0.00</td> </tr> </tbody> </table>			篩目寸法 (mm)	残留量 (g)	通過率 (%)	0.85	1.25	98.75	0.71	6.25	92.50	0.60	25.00	67.50	0.50	25.00	42.50	0.42	26.50	16.00	0.35	9.50	6.50	0.30	6.00	0.50	以下	0.50	0.00
篩目寸法 (mm)	残留量 (g)	通過率 (%)																											
0.85	1.25	98.75																											
0.71	6.25	92.50																											
0.60	25.00	67.50																											
0.50	25.00	42.50																											
0.42	26.50	16.00																											
0.35	9.50	6.50																											
0.30	6.00	0.50																											
以下	0.50	0.00																											
NYC 新潟日本油設株式会社																													

付録-1(b) 膨張真珠岩の化学成分等

**製品安全データシート
(M S D S)**

会社 東興パーライト工業株式会社

MSDS No. TP-ALL

作成・改訂 平成 17年 12月 12日

製品名 (化学名、商品名など)	トブコ・パーライト Na.31 Na.34 Na.36 Na.38 Na.38S Na.51 Na.52 Na.52S Na.52SP Na.53P Na.54 Na.55 Na.1B Na.1BS Na.1D Na.2B Na.3A Na.5B Na.5BN Na.6B M Na.71W
-----------------	---

物質の特定	単一製品・混合物の区別 化学名(鉱物名)	単一製品 パーライト
	主な化合物含有量 と構造	非晶質ガラス構造(アルミニウムカリウムトリウムシリケート) Si·Al·K·Na·O·H ₂ O … 96%以上
	労働安全衛生法(57条の2第1項) 通知対象物質	No.311 シリカ *…2%以下 (*シリカは主にクリストバライトと石英から成る)
	P R T R 法	対象外(対象物含有量: 0)
	C A S N o .	93763-70-3(パーライト)
	T S C A	対象外
	E I N E C S	対象外
	国連分類及び国連番号	対象外

危険有害性の分類	分類の名称	分類基準には該当しない。
	有害性	粉塵を長年月(年単位)吸入したとき有害。
救急処置	眼に入った場合	目を擦ったり固く閉じないこと。清浄な水で瞼を指でよく開いて眼球、瞼の隅々まで水がよく行き渡るように洗浄する。異物感や痛みが残るときは、眼科医による診療を要する。
	皮膚に付いた場合	水で洗い流してから水と石鹼で皮膚を洗浄する。脱脂作用があるので、肌が荒れた場合はハンドクリーム等でケアを行う。
	吸入した場合	新鮮な空気を吸う。 鼻をかみ、うがい等を行い粉塵を排出する。
	飲み込んだ場合	水で口の中を洗浄する。

付録-1(c) ナトレックスLの化学成分等

蛍光X線法による化学成分の分析結果

(mass%)

	1回目	2回目
C	2.8	2.5
N	1.9	2.1
O	13	12
Na	26	26
Al	0.41	0.35
Si	3.4	3.2
S	0.031	0.028
Cl	52	53
K	0.3	0.29
Ca	0.11	0.11
Fe	0.060	0.056
Br	0.045	0.045

測定装置; リガク製
蛍光X線分析装置 ZSX Primus II

X線回折法による化合物形態の分析結果

主として、NaClを検出した。

測定装置;
リガク製 広角X線回折装置 RU200B

付録-1(d) ナトレックスMの化学成分等

蛍光X線法による化学成分の分析結果

(mass%)

	1回目	2回目
B	1.3	1.2
C	13	12
O	56	57
Na	15	17
Al	0.0047	0.0080
Si	0.69	0.77
S	0.032	0.028
Cl	0.13	0.15
K	15	12
Ca	0.017	0.018
Fe	0.017	0.013

測定装置：リガク製
蛍光X線分析装置 ZSX Primus II

X線回折法による化合物形態の分析結果

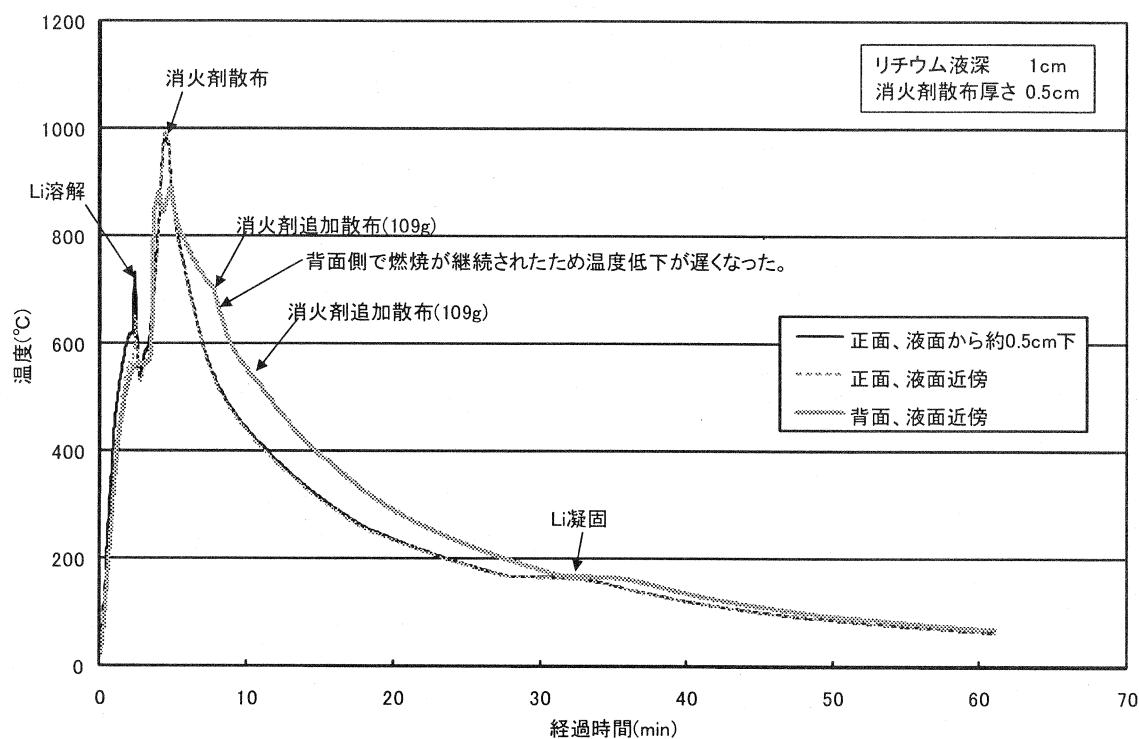
主として、 Na_2CO_3 を検出した。 Li_2CO_3 、 K_2CO_3 の存在も検出した。

測定装置：
リガク製 広角X線回折装置 RU200B

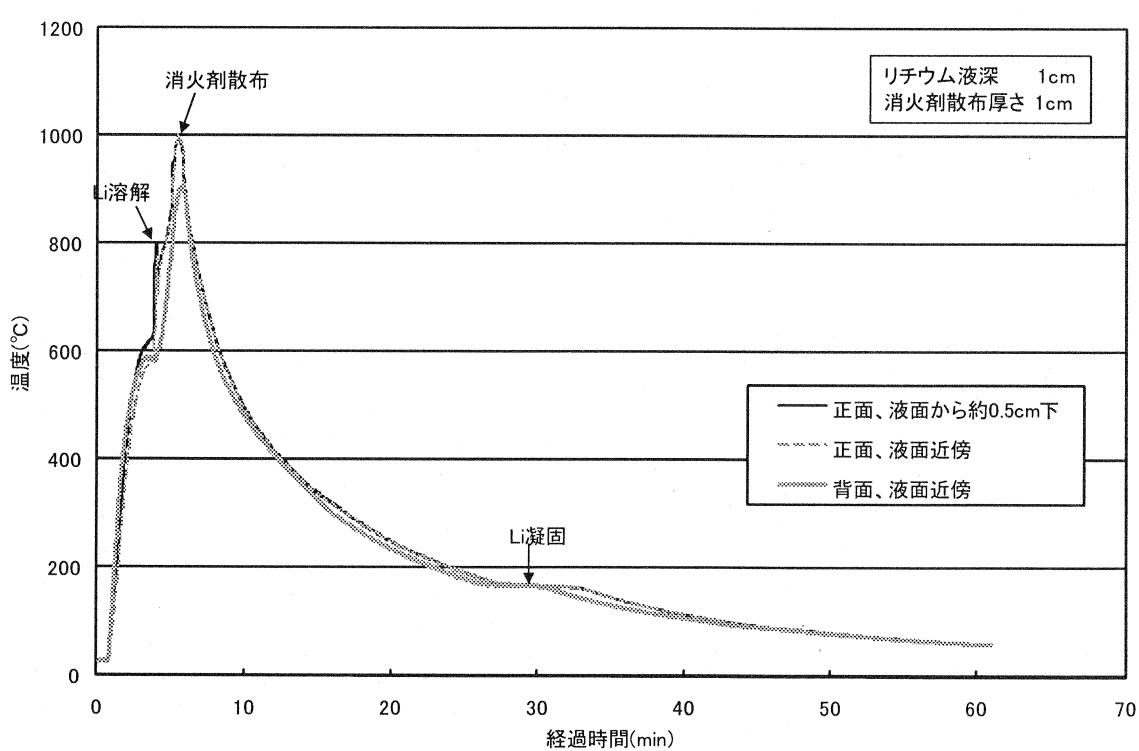
付録-2

消火性能確認実験における温度変化

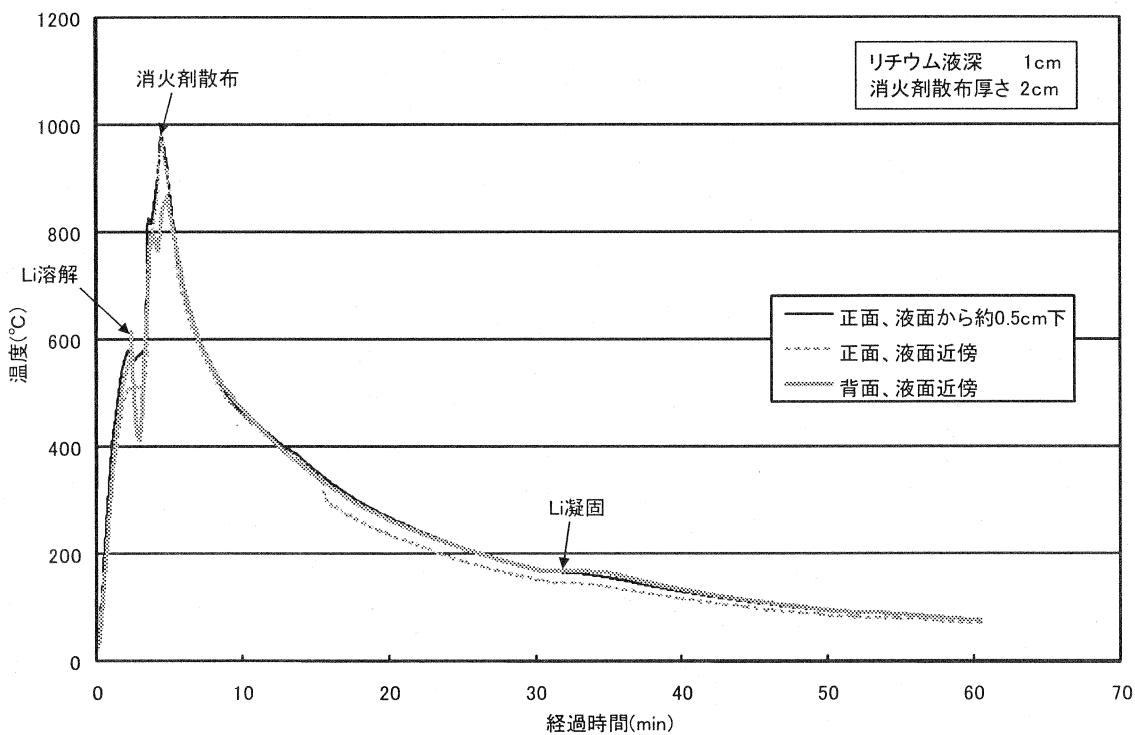
This is a blank page.



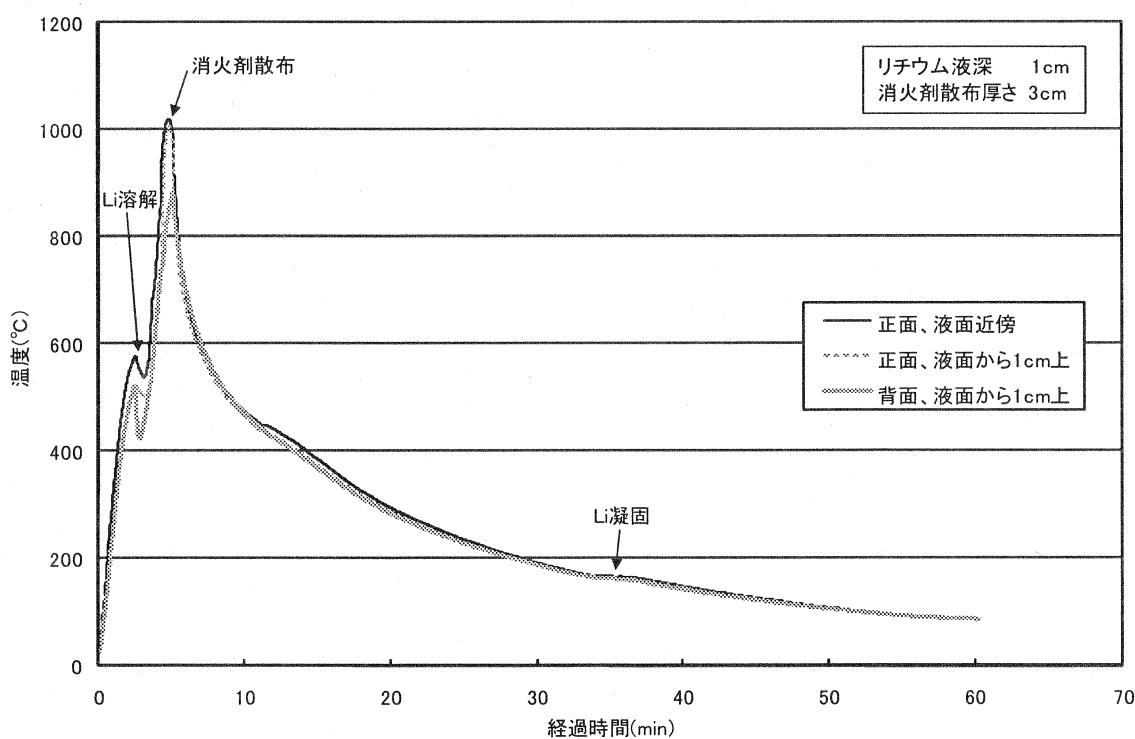
付録-2(a) 消火性能確認実験（実験 No.L1-N0.5）における温度変化



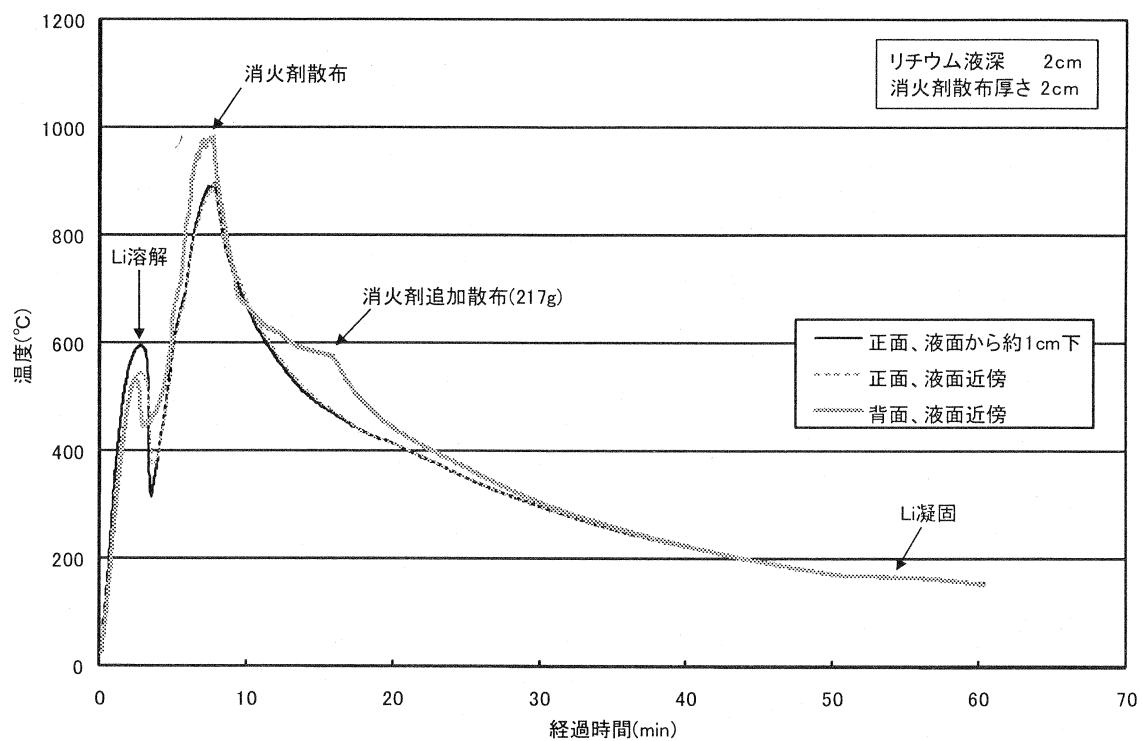
付録-2(b) 消火性能確認実験（実験 No.L1-N1）における温度変化



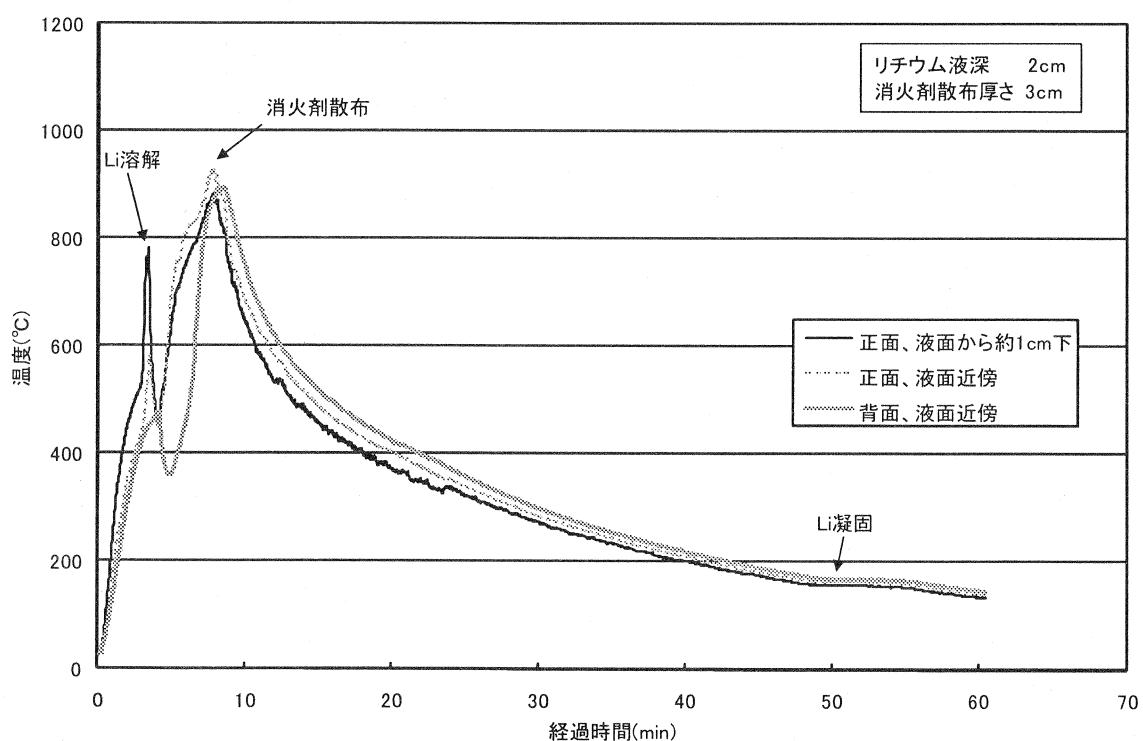
付録-2(c) 消火性能確認実験（実験 No.L1-N2）における温度変化



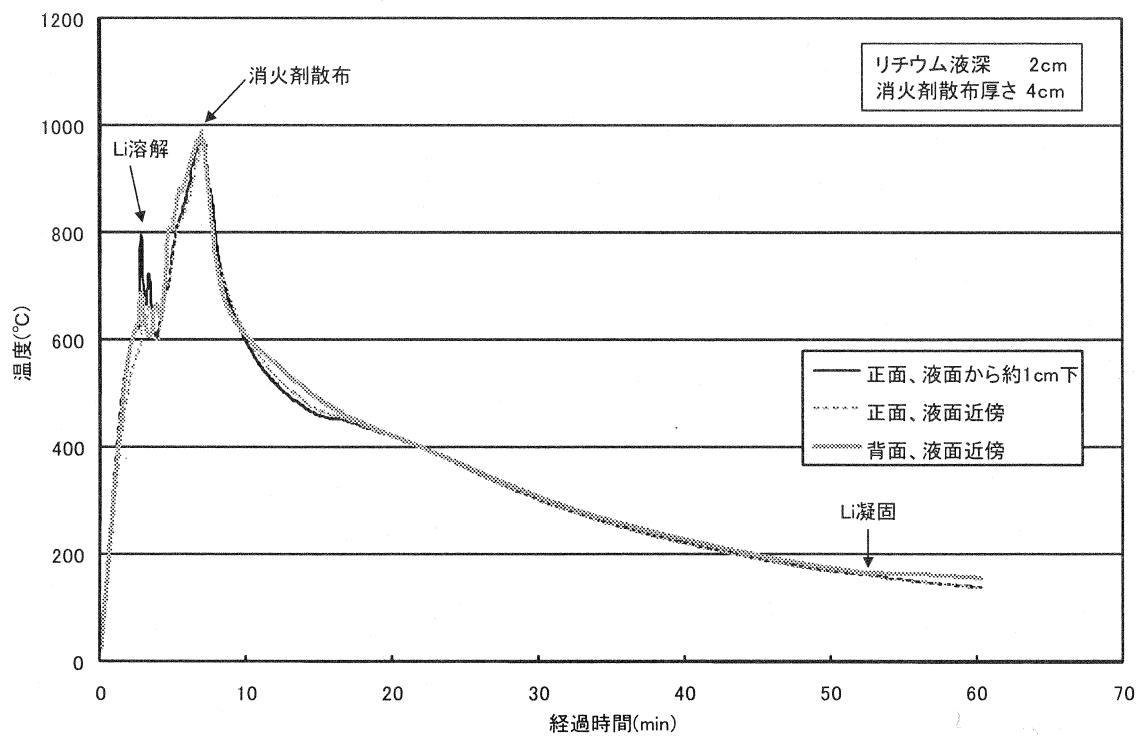
付録-2(d) 消火性能確認実験（実験 No.L1-N3）における温度変化



付録-2(e) 消火性能確認実験（実験 No.L2-N2）における温度変化



付録-2(f) 消火性能確認実験（実験 No.L2-N3）における温度変化



付録-2(g) 消火性能確認実験（実験 No.L2-N4）における温度変化

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	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	A
熱力学温度	ケルビン	K
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

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立方メートル	m^3
速度, 加速度	メートル毎秒	m/s
波数	メートル毎秒	m/s
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ル	kg/m^2
比體積	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ル	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^3
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ル	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

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	他のSI単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	$1^{(b)}$
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	$1^{(b)}$
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz	s^{-1}
力	ニュートン	N	$m \ kg \ s^{-2}$
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m^2
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	$m^2 \ kg \ s^{-2}$
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	$m^2 \ kg \ s^{-3}$
電荷, 電気量	クーロン	C	$s \ A$
電位差(電圧), 起電力	ボルト	V	$m^2 \ kg \ s^{-3} \ A^{-1}$
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	$m^2 \ kg \ s^{-3} \ A^{-2}$
コンダクタンス	シーメンス	S	A/V
磁束密度	ウエーバー	Wb	$m^2 \ kg \ s^{-2} \ A^{-1}$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス度	セルシウス度 ^(e)	°C	K
光束度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)
照度	ルクス	lx	lm/m^2
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq	s^{-1}
吸収線量, 比エネルギー一分率	グレイ	Gy	J/kg
カーマ			$m^2 \ s^{-2}$
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
酸素活性	カタール	kat	$m^2 \ s^{-2}$

(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せても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコ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) ヘルツは周期現象についてのみ、ベク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) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。

(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ICIPM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

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	$m^{-1} \ kg \ s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	$m^2 \ kg \ s^{-2}$
表面張力	ニュートン每メートル	N/m	$kg \ s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m^{-1} \ s^{-1}=s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	$m^{-1} \ s^{-2}=s^{-2}$
熱流密度, 放射照度	ワット每平方メートル	W/m ²	$kg \ s^{-3}$
熱容量, エントロピー	ジュール每ケルビン	J/K	$m^2 \ kg \ s^{-2} \ K^{-1}$
比熱容量, 比エントロピー	ジュール每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	ジュール每キログラム	J/kg	$m^2 \ s^{-2}$
熱伝導率	ワット每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	ジュール每立方メートル	J/m ³	$m^1 \ kg \ s^2$
電界の強さ	ボルト每メートル	V/m	$m \ kg \ s^{-3} \ A^{-1}$
電荷密度	クーロン每立方メートル	C/m ³	$m^{-3} \ sA$
表面電荷密度	クーロン每平方メートル	C/m ²	$m^{-2} \ sA$
電束密度, 電気変位	クーロン每平方メートル	C/m ²	$m^{-2} \ sA$
誘電率	アラード每メートル	F/m	$m^3 \ kg^{-1} \ s^4 \ A^2$
透磁率	ヘンリー每メートル	H/m	$m \ kg \ s^{-2} \ A^2$
モルエネルギー	ジュール每モル	J/mol	$m^2 \ kg \ s^{-2} \ mol^{-1}$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール每モル每ケルビン	J/(mol K)	$m^2 \ kg \ s^{-2} \ K^{-1} \ mol^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン每キログラム	C/kg	$kg^{-1} \ sA$
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^{-2} \ s^{-3}$
放射強度	ワット每スチラジアン	W/sr	$m^3 \ m^{-2} \ kg \ s^{-3}=m^2 \ kg \ s^{-3}$
放射輝度	ワット每平方メートル每スチラジアン	W/(m ² sr)	$m^2 \ m^{-2} \ kg \ s^{-3}=kg \ s^{-3}$
酵素活性濃度	カタール每立方メートル	kat/m ³	$m^{-3} \ s^{-1} \ mol$

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^9	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^6	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^3	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^2	ヘクト	h	10^{-21}	ゼット	z
10^1	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

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=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	$1^\circ=(\pi/180) \ rad$
分	'	$1'=(1/60)^\circ=(n/10800) \ rad$
秒	"	$1''=(1/60)'=(n/648000) \ rad$
ヘクタール	ha	$1ha=1hm^2=10^4m^2$
リットル	L	$1L=1dm^3=10^3cm^3=10^{-3}m^3$
トン	t	$1t=10^3kg$

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	$1eV=1.602 \ 176 \ 53(14) \times 10^{-19}J$
ダルトン	Da	$1Da=1.660 \ 538 \ 86(28) \times 10^{-27}kg$
統一原子質量単位	u	$1u=1 Da$
天文単位	ua	$1ua=1.495 \ 978 \ 706 \ 91(6) \times 10^{11}m$

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	$1bar=0.1MPa=100kPa=10^5Pa$
水銀柱ミリメートル	mmHg	$1mmHg=133.322Pa$
オングストローム	Å	$1 \text{ \AA}=0.1nm=100pm=10^{-10}m$
海里	M	$1 M=1852m$
ノット	b	$1 b=100fm^2=(10^{-12}cm)^2=10^{-28}m^2$
ノット	kn	$1 kn=(1852/3600)m/s$
ペル	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベル	B	
デジベル	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	$1 erg=10^{-7}J$
ダイナ	dyn	$1 dyn=10^{-5}N$
ポアソン	P	$1 P=1 \text{ dyn } s \text{ cm}^{-2}=0.1 Pa \ s$
ストークス	St	$1 St=1cm^2 \ s^{-1}=10^4m^2 \ s^{-1}$
スチルブ	sb	$1 sb=1cd \ cm^{-2}=10^4cd \ m^{-2}$
フォント	ph	$1 ph=1cd \ sr \ cm^{-2} \ 10^4lx$
ガル	Gal	$1 Gal=1cm \ s^{-2}=10^{-2}ms^{-2}$
マックスウェル	Mx	$1 Mx=1G \ cm^2=10^8Wb$
ガウス	G	$1 G=1Mx \ cm^2=10^4T$
エルステッド	Oe	$1 Oe \triangleq (10^3/4\pi)A \ m^{-1}$

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 \triangleq 」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

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリ	Ci	$1 Ci=3.7 \times 10^{10}Bq$
レントゲン	R	$1 R=2.58 \times 10^4C/kg$
ラド	rad	$1 rad=1cGy=10^2Gy$
レム	rem	$1 rem=1cSv=10^2Sv$
ガンマ	γ	$1 \gamma=1 nT=10^{-9}T$
フェルミ	fm	$1 \text{フェルミ}=1 fm=10^{-15}m$
メートル系カラット		$1 \text{メートル系カラット}=200 mg=2 \times 10^{-4}kg$
トル	Torr	$1 Torr = (101 325/760) Pa$
標準大気圧	atm	$1 atm = 101 325 Pa$
カロリ	cal	$1 cal=4.1868J \ (15^\circ C \text{カロリー}), 4.1868J \ ((IT) \text{カロリー})$
ミクロン	μ	$1 \mu=1 \mu m=10^{-6}m$

