



平成28年度

船用液体水素用温度センサ及び温度監視システムの技術開発
成果報告書

平成29年3月

一般社団法人 日本船用工業会

はしがき

本報告書は、BOAT RACE の交付金による日本財団の助成金を受けて、平成 27 年度、28 年度の 2 年計画で、一般社団法人日本船用工業会が明陽電機株式会社に委託して実施した「船用液体水素用温度センサ及び温度監視システムの技術開発」の成果をとりまとめたものである。

燃料電池自動車への水素利用の動きが進んでいることなどを背景として、世界初の液体水素運搬船が実用化に向けて計画されている。しかし、船舶用として -253°C の超低温を計測可能な船用液体水素用温度センサはない。そのため、平成 26 年度 F S 事業で調査した結果、感度を向上することにより液体水素用温度センサの開発が実現可能であることが分かった。そこで、温度センサの用途（タンク内、ガス漏れ、荷役用配管等）に最適な形状とした 5 種類の船用液体水素用温度センサ及び温度監視システムの開発を行った。

ここに、貴重な開発資金を助成いただいた日本財団、並びに関係者の皆様に厚く御礼申し上げる次第である。

平成 29 年 3 月
(一社)日本船用工業会

目 次

第 I 部 平成 27 年度	1
1. 事業の目的	1
2. 事業の目標	1
2.1 本事業の最終目標	2
2.2 平成 27 年度の目標	2
3. 平成 27 年度の実施内容	2
3.1 船用液体水素用温度センサのプロトタイプ設計	2
3.1.1 設計要件の調査	2
3.1.2 プロトタイプセンサの設計	8
3.2 船用液体水素用温度センサのプロトタイプ試作	15
3.3 -253℃の超低温領域の温度計測に必要なセンサ性能	17
3.3.1 LNG 船用温度センサに用いられる従来技術と比較して 10 倍の感度向上	18
3.3.2 LNG 船用温度センサに用いられる従来技術と比較して 10%の応答性向上	19
3.3.3 -253℃の超低温領域の温度計測に必要なセンサ性能のまとめ	19
3.4 -253℃の超低温領域における性能評価	20
3.4.1 性能評価方法の検討	20
3.4.2 評価試料の温度校正	21
3.4.3 比較法評価基準となる温度値の検証	22
3.4.4 液体水素を用いた評価試験	24
3.4.5 温度計測精度の評価に対する外乱の調査及び検証	28
3.4.6 プロトタイプセンサの温度計測精度の評価	31
3.4.7 液体水素-253℃による熱負荷前後のプロトタイプセンサの性能検証	35
3.5 温度センサ素子への通電回路の設計	36
3.5.1 温度センサ素子に印加される突入電流の調査	36
3.5.2 加速試験による突入電流の影響評価	40
3.5.3 突入電流を抑制する通電回路設計	43
3.5.4 自動切換え仕様の通電回路設計	45
3.5.5 長寿命化を目的とした温度センサ素子への通電回路設計のまとめ	47
3.5.6 温度監視システムが保証可能な温度計測精度	47
4. 平成 27 年度の目標の達成状況	50

第Ⅱ部 平成28年度	52
5. 平成28年度の実施内容	52
5.1 実用化に供する船用液体水素用温度センサの設計	52
5.1.1 温度センサの用途及び仕様検討	52
5.1.2 船用液体水素用温度センサの設計	54
5.2 実用化に供する船用液体水素用温度センサの試作	60
5.3 実用化に供する船用液体水素用温度センサの性能評価	61
5.3.1 液体水素を用いた-253℃の超低温領域における性能評価	61
5.3.2 インタンク用高精度温度センサの評価結果	63
5.3.3 応答性を追求したタンク内高精度液面ポジションセンサの評価結果	64
5.3.4 タンク内各部のモニター用温度センサの評価結果	65
5.3.5 船内多用途に対応する温度センサの評価結果	66
5.3.6 表面温度計測用センサの評価結果	67
5.3.7 液体水素を用いた-253℃の超低温領域における性能評価のまとめ	68
5.4 船級承認のための試験及び書類作成	69
5.4.1 試験方案の作成及び試験品の製作	69
5.4.2 船級承認に必要な温度センサの評価試験	70
5.4.3 船級承認のための書類作成	71
5.5 マイクロプロセッサの試作	71
5.5.1 マイクロプロセッサの仕様検討	71
5.5.2 マイクロプロセッサの設計	75
5.5.3 マイクロプロセッサの試作	76
5.5.4 マイクロプロセッサの機能及び性能評価	77
5.5.5 マイクロプロセッサにおける船級承認の適否を確認する事前試験	86
5.6 温度監視システムのための配線システムの試作	91
5.6.1 配線システムの仕様及び機器構成検討	91
5.6.2 配線システムの設計	94
5.6.3 配線システムの試作	98
5.6.4 配線システムの機能及び性能評価	98
5.7 船用液体水素用温度監視システムとしての最終評価	103
5.7.1 温度センサと配線システムの組み合わせによる計測精度の評価	104
5.7.2 船用液体水素用温度監視システムにおける結論	107
6. 平成28年度の目標達成状況	107
7. 本技術開発における自己評価	109
8. 船用液体水素用温度計測機器としての今後の取組み	109

第 I 部 平成 27 年度

1. 事業の目的

近年、地球温暖化防止を目的とした、環境負荷低減に対して世界的な削減目標が設定され、その目標の達成が強く望まれている。天然ガスは燃料に含まれる炭素比率が低く硫黄分も含まないため、排気ガスのエミッション特性に優れる。船用機関のガスエンジン化は環境負荷の要因となる CO₂, NO_x, PM, SO_x を大幅に低減するひとつの方策として期待されている。

一方で、天然ガスよりも排気ガスのエミッション特性に優れた CO₂ フリーの水素エネルギーが注目され、国では燃料電池自動車 (FCV) の 2015 年の市場投入及び世界に先駆けた普及促進を目指しており、需要の拡大に対応した安価な水素の供給ラインの確保が必要となっている。このような中、水素エネルギーチェーン構想が推進され、国の方針である世界初の液体水素運搬船が 2020 年を目処として川崎重工業株式会社で建造される。

LNG 運搬船は -163℃ の低温計測が必要とされるが、液体水素では -253℃ の超低温領域の温度計測が必要となる。陸上用として -253℃ の超低温を計測可能な温度センサはあるが、これらは船舶で重要視される振動や動揺、塩害等を考慮したものではなく、船級認証された -253℃ の超低温を計測可能な船用液体水素用温度センサはない。

そのため、日本船用工業会の F S 事業にて -253℃ を計測可能な温度センサについて、調査・試設計をした結果、温度計測における感度を向上すれば、船用液体水素用温度センサの開発が実現可能との結論に至り、本新製品開発事業に申請することとした。

本事業では液体水素運搬船に必要な -253℃ の超低温領域の温度計測に対して LNG 船用温度センサに用いられている従来の技術と比較して、10 倍の感度と 10% 向上させた応答性を有する高精度な船用液体水素用温度センサを試作すると共に、温度センサ素子への電流制御と通電回路の自動切換による長寿命化の技術を確認する。これらの技術を応用して、温度センサの装備場所や用途 (タンク内液体水素温度、ガス漏れ、荷役用配管等) に応じた形状の異なる数種類の装備し易くメンテナンスの容易な、最適形状の船用液体水素用温度センサを開発する。

また、温度監視システムのための配線システムの試作を行う。本配線システムは、集中監視室以外での監視が可能なものとするとともに、センサからの出力をアナログからデジタル信号に変換することで、総電線長さを削減する。アナログの場合はセンサの数だけ電線が必要であるが、デジタルの場合は基本的には 1 本の電線で済むからである。

2013 年に制定された国際規格「ISO 16425 (船内 LAN 装備指針)」において規定されている「ネットワークの冗長性」を採用することとし、万一ネットワークの一部が断線するようなことが生じてセンサからの情報伝送が途切れのないシステムを実現する。

2. 事業の目標

日本財団の助成を得て実施する「船用液体水素用温度センサ及び温度監視システムの技術開発」にて、世界初の液体水素運搬船向けの温度計測機器を試作、実際に液体水素を用いた

性能評価を行い、その成果を活用して船舶に搭載可能な液体水素用温度センサ及び温度監視システムの商品化を目指す。本事業の最終目標及び平成27年度の目標を次に記す。

2.1 本事業の最終目標

- ① -253℃の超低温領域の温度計測を高精度で実現するとともに、温度センサの装備場所や用途(タンク内液体水素温度、ガス漏れ、荷役用配管等)に最適な形状とした5種類の実用化に供する船用液体水素用温度センサを開発・試作する。
- ② 温度センサ素子への電流制御及び通電回路の自動切換により、船用液体水素用温度センサの長寿命化を図る。
- ③ ネットワークの冗長性向上と、デジタル信号変換を用いることで可能となる船用電線から軽量の信号ケーブルへの置換えによる電線重量の削減を追求した、温度監視システムの開発を行う。

2.2 平成27年度の目標

- ① -253℃の超低温領域の温度を、LNG船用温度センサに用いられている従来の技術と比較して、10倍の感度と10%向上させた応答性で温度計測が可能な、船用液体水素用温度センサの設計及び試作を行い、性能評価試験を実施する。
- ② 温度センサ素子への電流制御及び通電回路の自動切換えにより、船用液体水素用温度センサの長寿命化を実現する、温度センサ素子への通電回路設計を実施する。
(通電回路は平成28年度試作のマイクロプロセッサに搭載予定)

3. 平成27年度の実施内容

船用液体水素用温度センサ及び温度監視システムの技術開発における平成27年度の実施内容を報告する。

3.1 船用液体水素用温度センサのプロトタイプ設計

3.1.1 設計要件の調査

プロトタイプ温度センサの設計に向けて、水素社会の実現に向けた国としての取り組みや水素の特性などを主体に調査し、船用液体水素用温度センサに必要とされる設計要件を確認した。

1) 水素社会の実現に向けた国としての取り組み

水素社会の実現「水素の製造から利用に至るまでのサプライチェーン構想」について調査した。

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(以降、NEDO)の「未利用褐炭由来水素大規模海上輸送サプライチェーン構築実証事業」として、2020年度のパイロットプロジェクトが計画されている。

また、水素の大量輸送を可能とする世界初の液体水素運搬船の建造及び就航に先立ち、安全基準の整備や国際基準化への取組みが進められており、日本と豪州、国際海事機関(略称 IMO)での安全基準の整備が検討されている。

水素の海上輸送方法として図1に示すように、液化方式によるガスキャリアでの水素輸送と、有機ハイドライド方式によるタンカーでの水素輸送の2つの方法が有力視されているが、本事業で開発を目指す船用液体水素用温度センサ及び温度監視システムは、常圧ガスに比べて体積を約800分の1に圧縮した液化方式による水素の輸送を可能とする液体水素運搬船向けとなる。

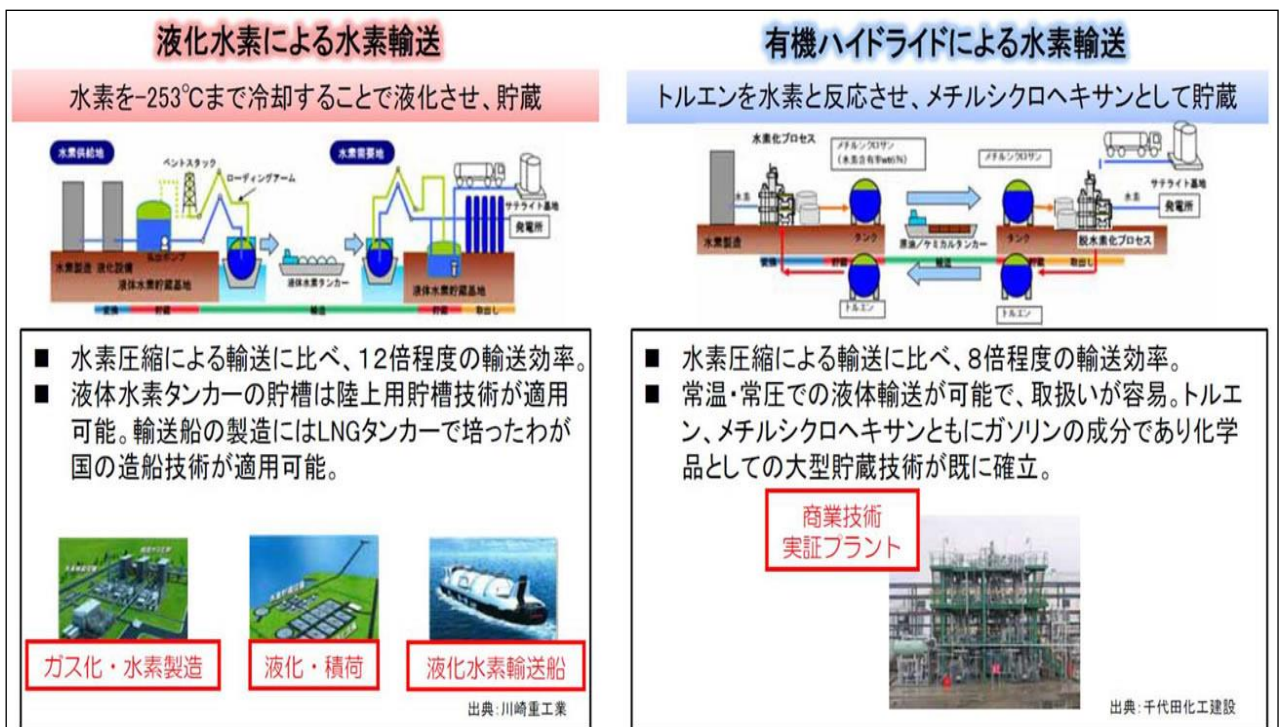


図1. 水素の海上輸送の方法

※出典：国土交通省「我が国のエネルギー調達の取組」

2) 液体水素運搬船によるパイロットプロジェクト

液体水素運搬船のパイロットプロジェクトについて調査した。

図2に日本における水素と燃料電池関連の市場規模予測を記すが、発電や燃料電池自動車などのプロセスによる水素需要は高まると予測されている。水素の利活用促進には、安価で安定的な水素の供給源確保と、水素の大量輸送を可能とする世界初の液体水素運搬船が必要不可欠となる。水素の供給源は、将来的な商用化では再生可能エネルギーなどを使って世界各地で水素を生産・液化することが検討されているが、パイロットプロジェクトでは豪州南東部メルボルン近郊のラトロブバレー地区で産出されている未利用資源である褐炭から生産した水素を液化して利用する。この褐炭で製造される水素は、日本の総発電量の240年分が期待される。

水素の大量輸送を可能とする液体水素運搬船は、2020 年度に世界で初めて建造される予定であり、試験運用を経て 2025 年から 2030 年を目処として商用化が計画されている。

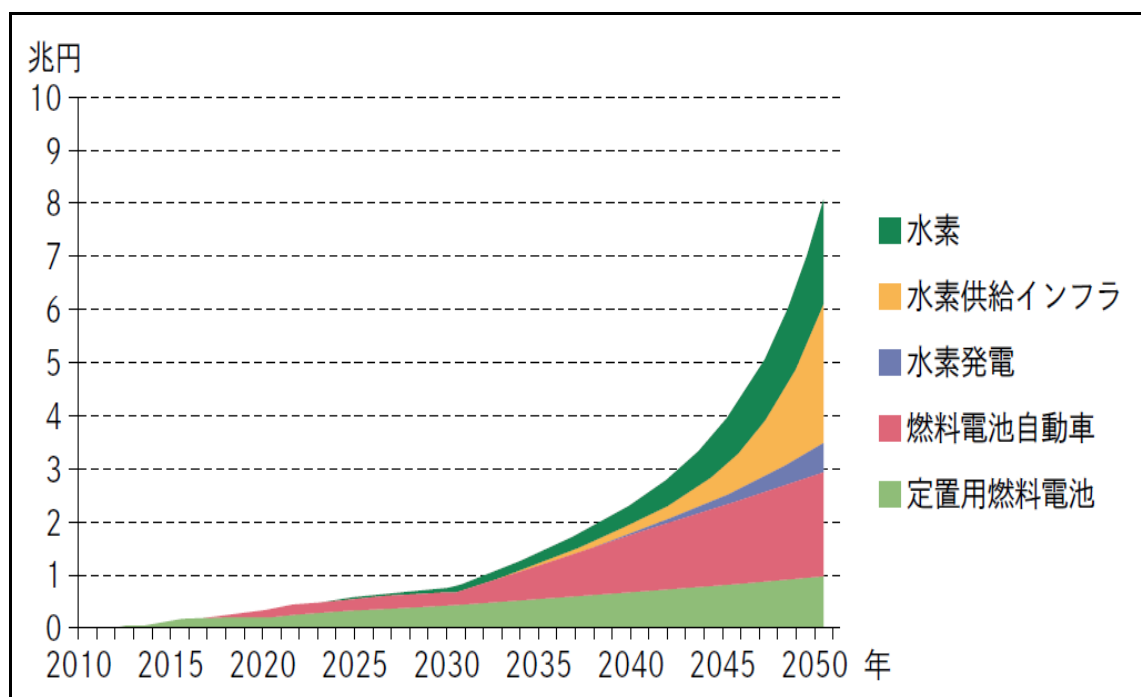


図2. 日本における水素と燃料電池関連の市場規模予測

※出典：NEDO「水素エネルギー白書」

3) 外部環境の調査

温度センサが装備される外部環境について調査した。

温度センサの基本構造はLNG船やLPG船で実績のある構造をベースとし、センサの外被材質にはオーステナイト系ステンレスを適用することとした。

航行時の波浪によって生じる動揺や推進機関及び発電機関に起因する振動による衝撃力を温度センサが受けることに配慮し、且つ、洋上というフィールドで顕著に見られる塩害に対して注意を要する。

4) オーステナイト系ステンレスにおける水素及び低温脆性の調査

オーステナイト系ステンレスにおける水素及び低温脆性を調査し、破壊リスクに備えて温度センサの外被材質にはSUS316L材を選定した。

貨物である液体水素の沸点が -253°C の超低温であること、ボイルオフにより水素ガスを発生させることから、水素及び低温脆性について国立研究開発法人海上技術安全研究所の指導を受けて調査した。その内容を表1に記載する。

表1. オーステナイト系ステンレスにおける水素及び低温脆性の調査

項目	調査結果
水素脆性	安定オーステナイトステンレスである SUS316L においては、-70℃付近をピークに水素脆性が見られるが、さらなる温度低下にしたがって脆性が小さくなり、-173℃ではほとんど見られなくなる。このことから、水素の沸点・253℃においては、水素脆性は影響しないと考える。
低温脆性	Ni 等価含有率の大きいオーステナイト系ステンレスは低温においてもフェライト、マルテンサイトに移行しないため、低温脆性の影響は小さい。
まとめ	ステンレスに固溶している水素の影響により、-70℃付近で水素脆性による若干の強度低下がみられるが、液体水素用温度センサとしての運用において、この温度領域は過渡的であるため設計的には問題ないと考えられる。

5) 水素の特性調査

水素の特性から本船の安全に関わる要素を抽出し、温度センサの取付け部及びタンク隔壁貫通部からの水素ガスリーク(ガス漏れ)に特に注意を払わなければならないことを認識した。水素分子は極めて小さく高いエネルギー分子であるためリークしやすく、リークした水素ガスは非常に燃えやすいことに加え、その火炎は透明であり目視では確認できない。これら調査した水素の特性を表2に記載する。

表2. 水素の特性

項目	調査結果
沸点 ※	-252.88℃ (LNG : -163℃)
液密度	0.071 ton/m ³ (LNG : 0.424 ton/m ³)
蒸発潜熱	446 kJ/kg (LNG : 510 kJ/kg)
粘度	12.5 μPa·s (LNG : 114.3 μPa·s)
爆発限界 (空気中)	4~75% (LNG : 5~15%)
最小着火エネルギー	0.02 mJ (LNG : 0.28 mJ)
液化時の体積	常圧ガスに対して約 800 分の 1
その他特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・自然界から直接得ることはできない二次エネルギーである。 ・非常に燃えやすく蒸発しやすい物質である。 ・火炎は透明であり目に見えないことから火災の発見が遅れる。 ・金属と結合しやすく脆化を引き起こす。 ・分子が小さく高いエネルギーを持つことにより漏れやすい。 ・爆発限界が広い。 ・早く拡散するため堆積しづらくガス爆発の危険性は低減される(隔離された区域を除く)

※水素の沸点は大気圧下での温度値

6) 温度計測精度の検討

世界初の液体水素運搬船に必要な温度計測精度を検討し、開発する温度センサの計測精度を $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ (-0.05°C , $+0.05^{\circ}\text{C}$ を含む)とした。検討した温度計測精度 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ は、JIS C1604 規格が定める許容差クラスAの精度 $\pm 0.15^{\circ}\text{C}$ (氷点試験)と比較して高精度となる。

液体水素やLNGなどの低温流体の蒸気圧は、温度変化に対して大きな影響を受ける。例えば、水が 0°C 付近から 100°C 上昇した場合、飽和蒸気圧の変化が 0.1MPa 程度であるのに対し、液体水素は約 7°C の温度変化で 0.5MPa 程度の飽和蒸気圧の上昇をもたらす。このような液体水素の物性から、本船の安全にはタンク内の液体水素温度を高精度で計測することが必要不可欠となる。

現在、安全基準が確立し海上を航行しているLNG船が要求するタンク内の温度計測精度は $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ である。LNGは 0.1MPa から 1.0MPa の飽和蒸気圧の変化で、約 40°C の温度上昇が生じる。一方で、液体水素はLNGと同様の飽和蒸気圧の変化において、約 10°C の温度上昇に留まり、LNGに対して4分の1程度の温度変化量となる。

従って、液体水素運搬船に必要とされる温度センサの計測精度は、LNG船が要求する $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ の4分の1が適切であると判断し、 -253°C から -243°C の超低温領域において $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ と決定した。なお、液体水素の飽和蒸気圧と温度値の詳細を表3に示すが、液体水素の監視に必要と判断した計測精度 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ の実現は、工業用温度センサとして技術的なハードルが極めて高い。

表3. 水素の飽和蒸気圧と温度の関係

飽和蒸気圧 MP a	温度 $^{\circ}\text{C}$
0.08	-253.65
0.10	-252.92
0.101325	-252.88
0.15	-251.48
0.20	-250.35
0.25	-249.40
0.30	-248.58
0.35	-247.86
0.40	-247.20
0.45	-246.60
0.50	-246.04
0.60	-245.03
0.80	-243.33
1.00	-241.91

7) 温度センサの構造要件検討

船用液体水素用温度センサに必要なとされる構造要件を検討し、以下①から⑤に示す構造や形状、材料とした。構造要件の検討は、決定した温度計測精度 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ 、 -253°C の超低温にある水素の沸点、液体水素が外部からの入熱による影響を受けた場合に非常に蒸発しやすい特性を持つことを十分考慮して行った。

- ① -253°C から -243°C の超低温領域における温度計測精度 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ を確保でき、且つ LNG よりも更に低温側に広い温度計測範囲に対応する、優れた応答性を有する小型化された感温部形状とする。
- ② 温度センサに用いる樹脂は、 -253°C の超低温に耐えうる実績のある材料とする。
- ③ 温度センサ端末に用いるケーブルの材質はフッ素樹脂系を採用し、 -253°C の超低温環境下での使用に適した材質とする。
- ④ 温度センサ内部に空気層を有する場合、 -253°C への急激な温度変化によってセンサ内部の圧力が変動して破損する恐れがある。従って、機械的強度に優れ、内部導線を物理的に拘束する導体(図3参照)を適用したシース測温抵抗体とする。
- ⑤ 水素の気液境界面より上部(気相側)からの入熱による影響を可能な限り抑制するため、温度センサを小型化して熱容量を小さくする。

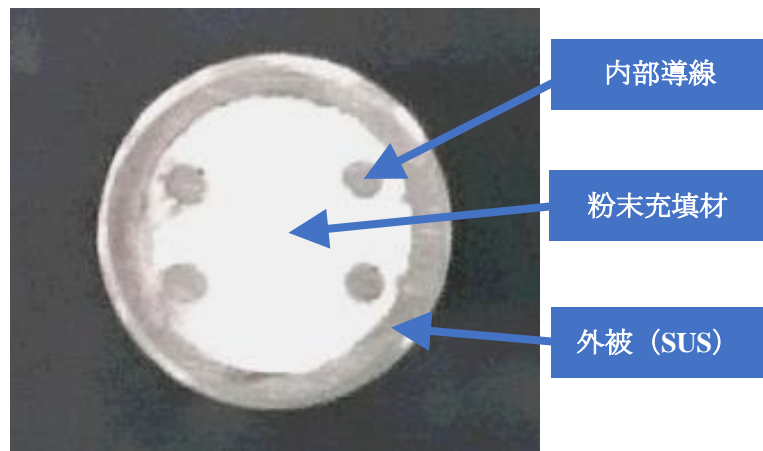


図3. シース測温抵抗体の導体断面

8) 設計要件の調査まとめ

3.1.1 項 1) から 7) までに述べた調査結果から、船用液体水素用温度センサのプロトタイプ的设计に対する要件のまとめを表4に記載する。

表 4. 船用液体水素用温度センサのプロトタイプ的设计要件

項目	設計要件
温度センサの外部環境	-253℃の超低温に耐えうる構造及び材料であること。
	塩害に耐性をもつ外被材質であること。
	動揺や振動による外部からの外力に耐えうる構造であること。
	水素及び低温脆性に耐性をもつ外被材質であること。
温度計測精度	-253℃から-243℃の超低温領域において±0.05℃とする。
外被の材質	SUS316L 材を適用する。
センサの感温部	温度計測精度に優れ小型化された抵抗素子を適用する。
センサの熱容量	感温部及び導体部を小型化して熱容量を限りなく抑制する。
導線の種類	機械的強度に優れ内部を物理的に拘束する導体を適用する。
その他構成材料	超低温環境下で実績のある材料を適用する。

3.1.2 プロトタイプセンサの設計

3.1.1 項に記載した設計要件の調査結果をもとに、船用液体水素用プロトタイプセンサの設計を下記①及び②に示す目的別に実施した。設計は、感温部の外径が異なる 3 種類 (Φ3.2mm、Φ2.0mm、Φ1.6mm) にて実施した。

水素及び低温脆性や-253℃の超低温に耐える材料を適用し、液体水素の温度計測に必要とされる熱容量を抑制した形状の温度センサ外形図を図 4 から図 9 に示す。

- ① 国立研究開発法人産業技術総合研究所(以降、産業技術総合研究所)で実施する性能評価試験用※液体水素を用いる試験設備に合せた短尺寸法
- ② 液体水素運搬船への搭載を想定した実用的なセンサ形状※長尺寸法

船用液体水素用プロトタイプセンサ $\phi 3.2$

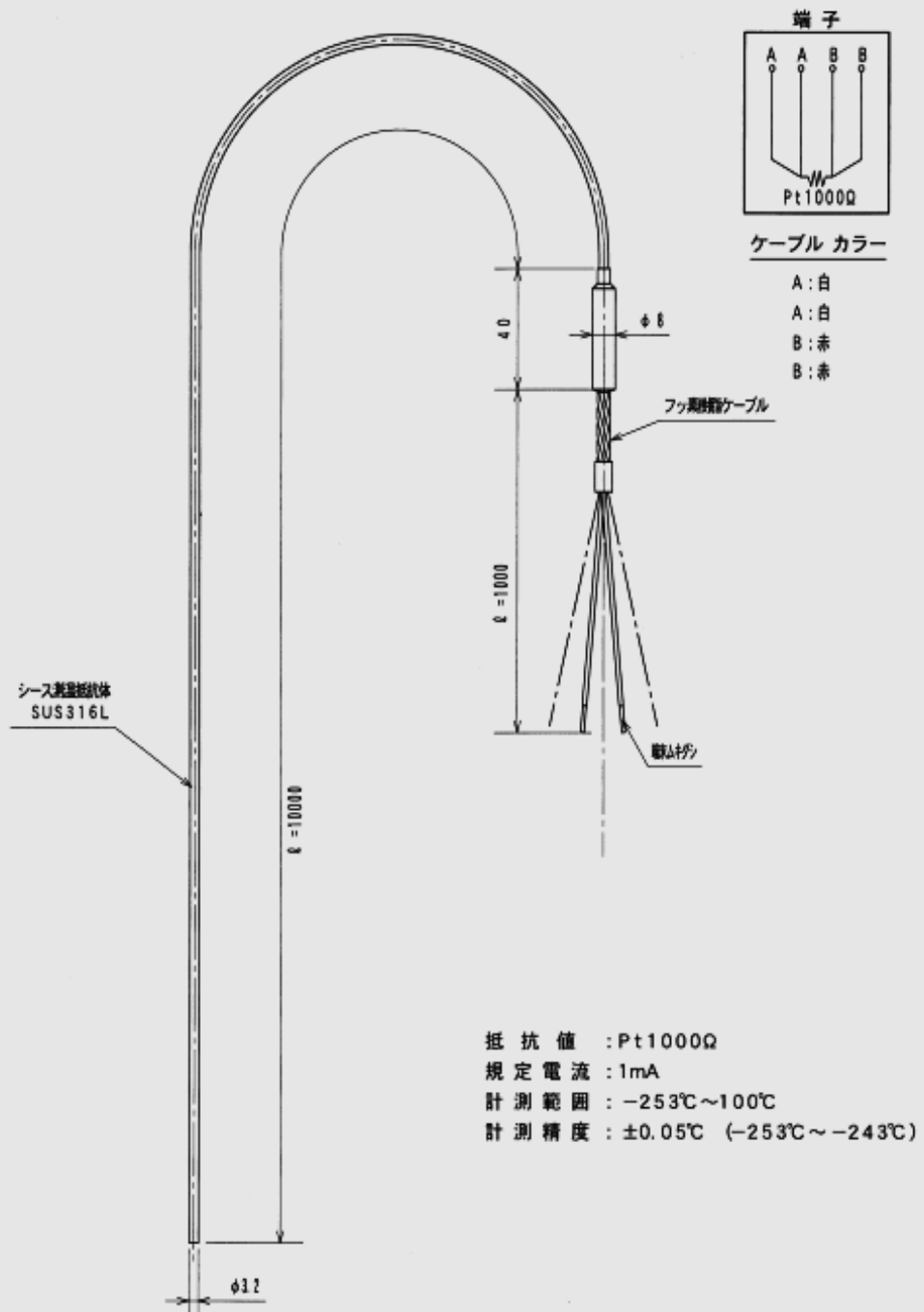


図4. 感温部外径 $\Phi 3.2$ mmプロトタイプセンサ外形図

船用液体水素用プロトタイプセンサ $\phi 2.0$

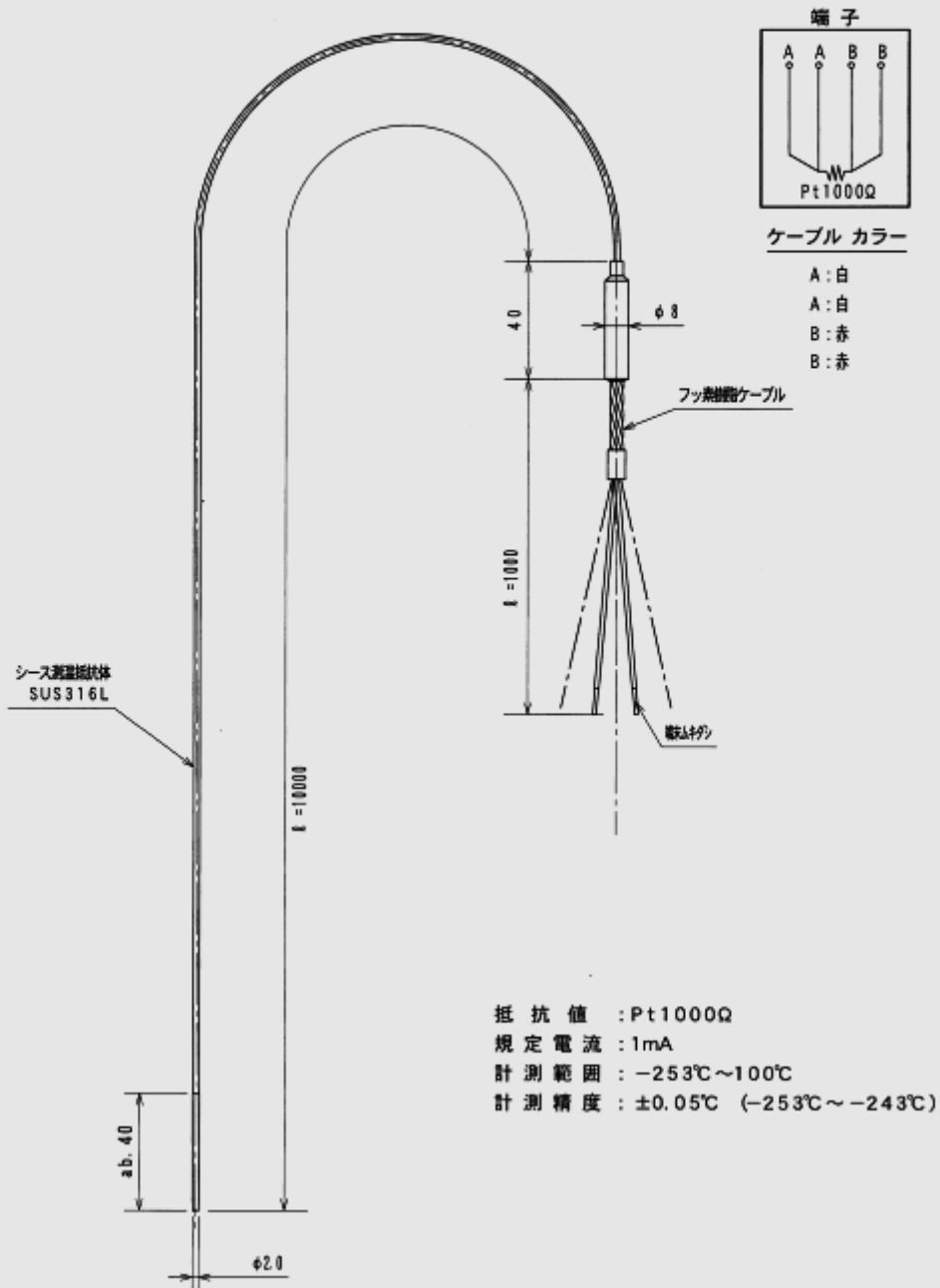


図5. 感温部外径 $\phi 2.0\text{mm}$ プロトタイプセンサ外形図

船用液体水素用プロトタイプセンサ φ 1.6

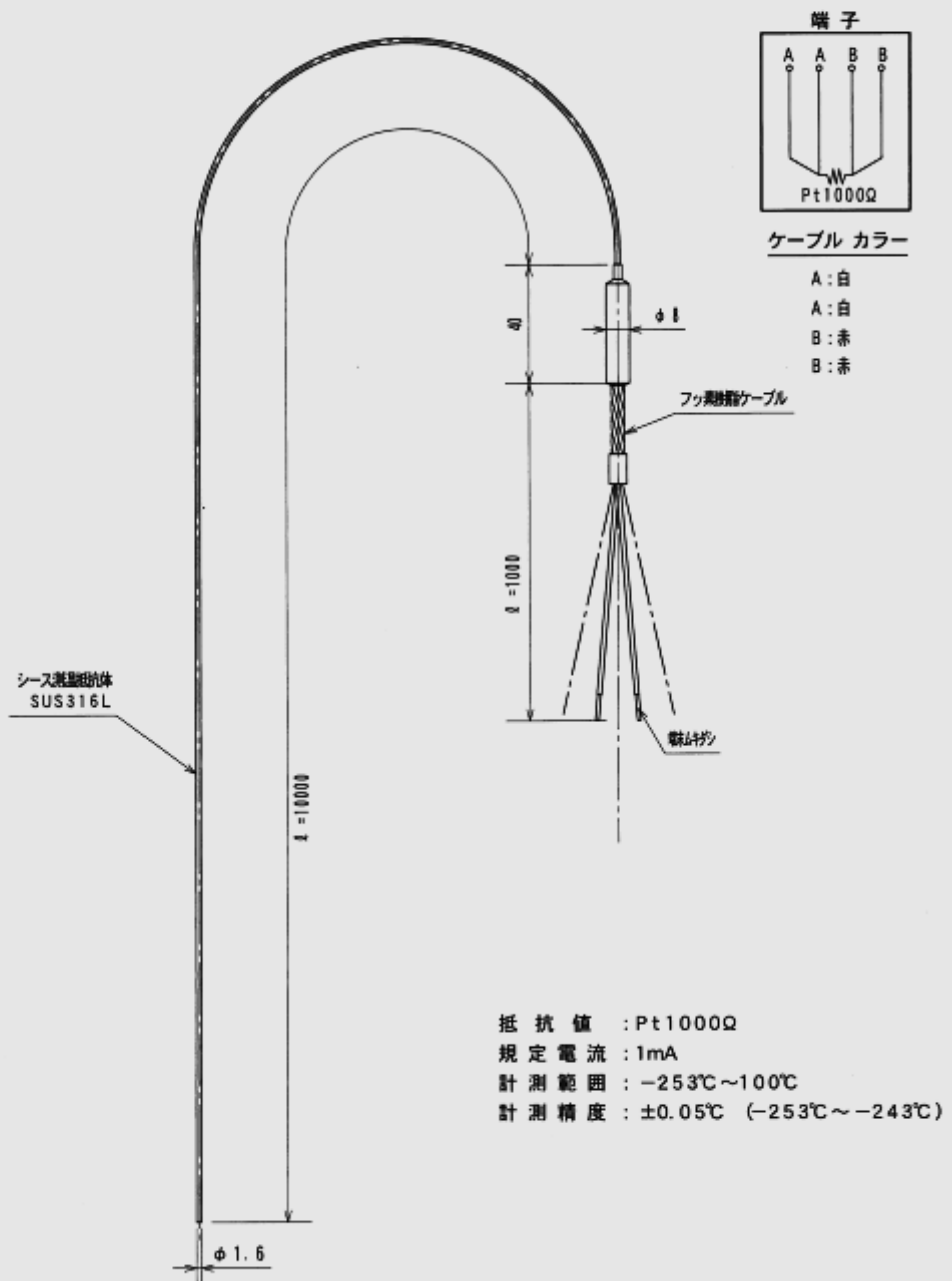


図 6. 感温部外径φ1.6mm プロトタイプセンサ外形図

性能評価試験用温度センサ $\phi 3.2$

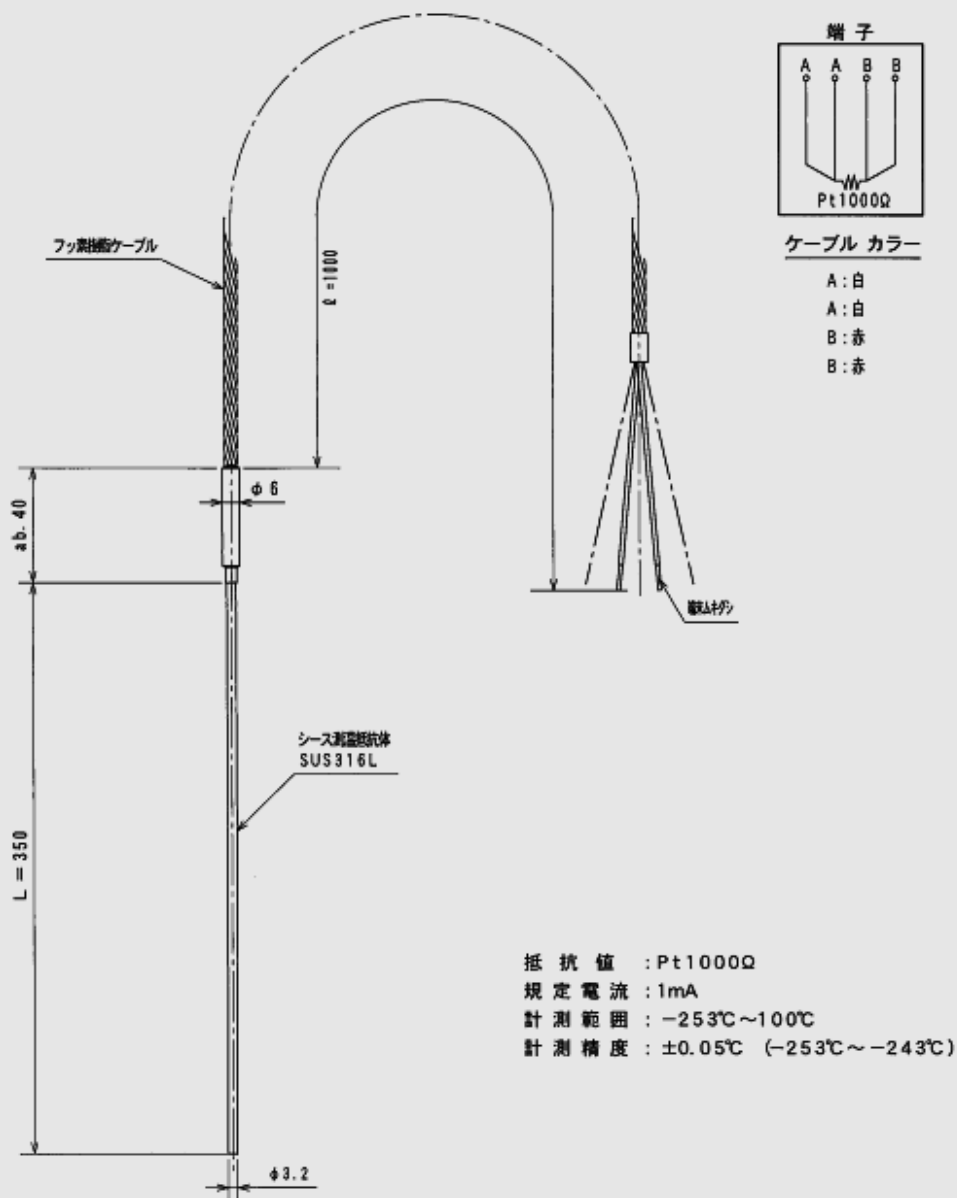


図 7. 感温部外径 $\phi 3.2\text{mm}$ 性能評価試験用センサ外形図

性能評価試験用温度センサ $\phi 2.0$

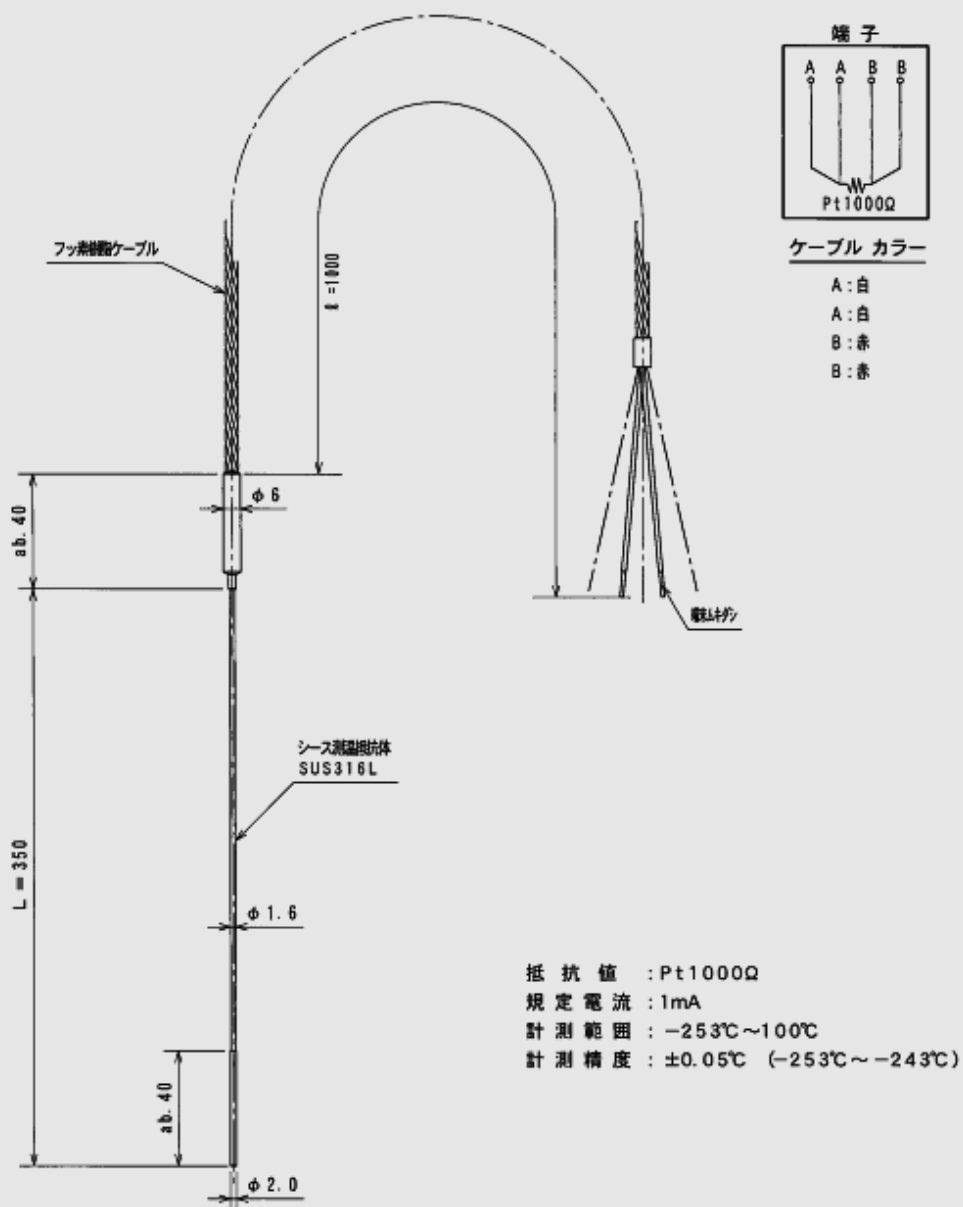


図8. 感温部外径 $\Phi 2.0$ mm 性能評価試験用センサ外形図

【注記】 $\Phi 2.0$ mm の性能評価用は、感温部外径による計測精度への影響や導体部からの入熱による影響を切り離し検証する目的にて、導体部外径を $\Phi 1.6$ mm とした。

性能評価試験用温度センサ φ1.6

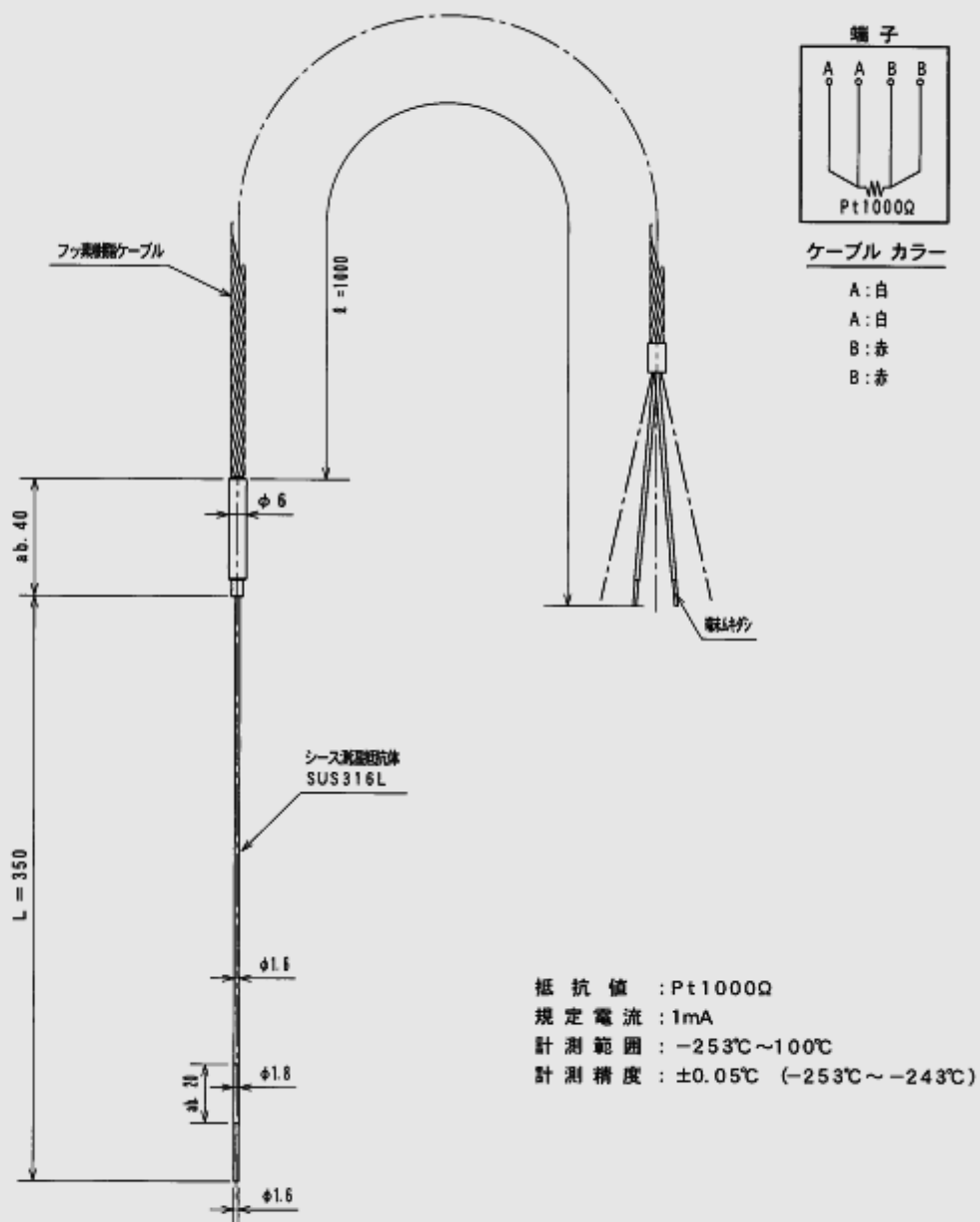


図9. 感温部外径 $\Phi 1.6$ mm 性能評価試験用センサ外形図

3.2 船用液体水素用温度センサのプロトタイプ試作

3.1.2 項に報告した設計をもとに、船用液体水素用のプロトタイプ温度センサを試作した。試作した温度センサは、設計段階の意図を反映した構造や形状、材質であることを確認した。各温度センサの外観を図10から図15に示す。

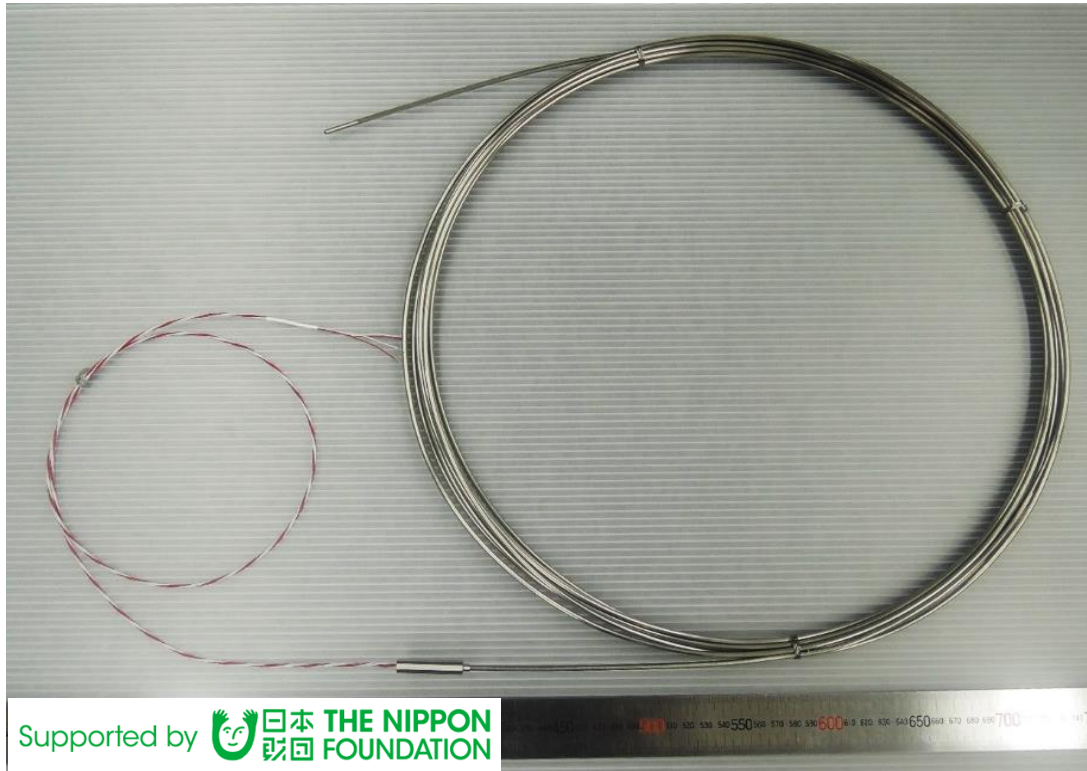


図10. $\Phi 3.2\text{mm}$ プロトタイプセンサ外観
(感温部及び導体部外径 $\Phi 3.2\text{mm}$ のシース测温抵抗体：導体部長さ10m)

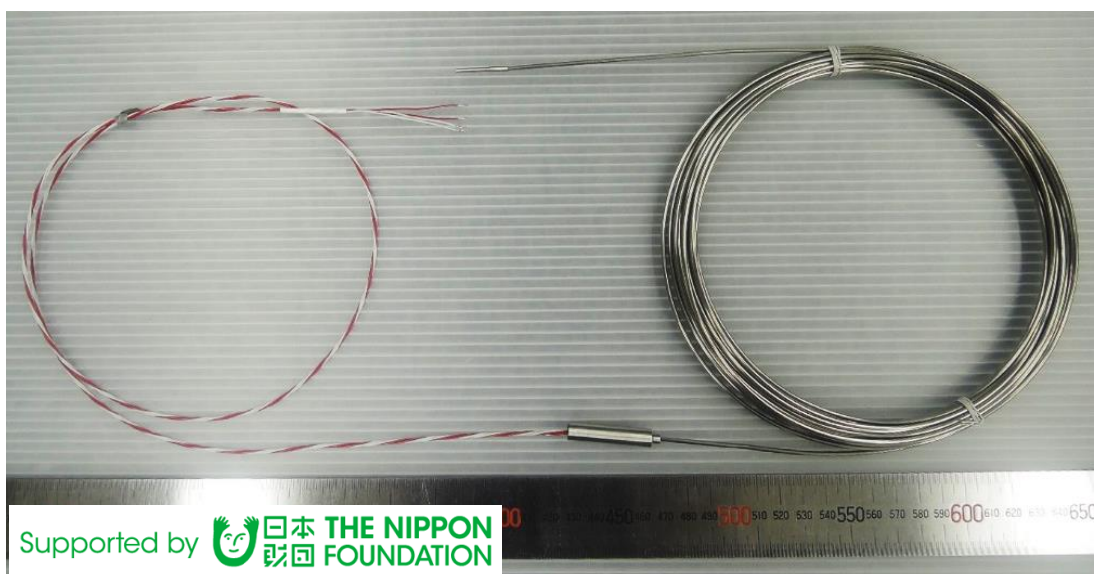


図11. $\Phi 2.0\text{mm}$ プロトタイプセンサ外観
(感温部及び導体部外径 $\Phi 2.0\text{mm}$ のシース测温抵抗体：導体部長さ10m)

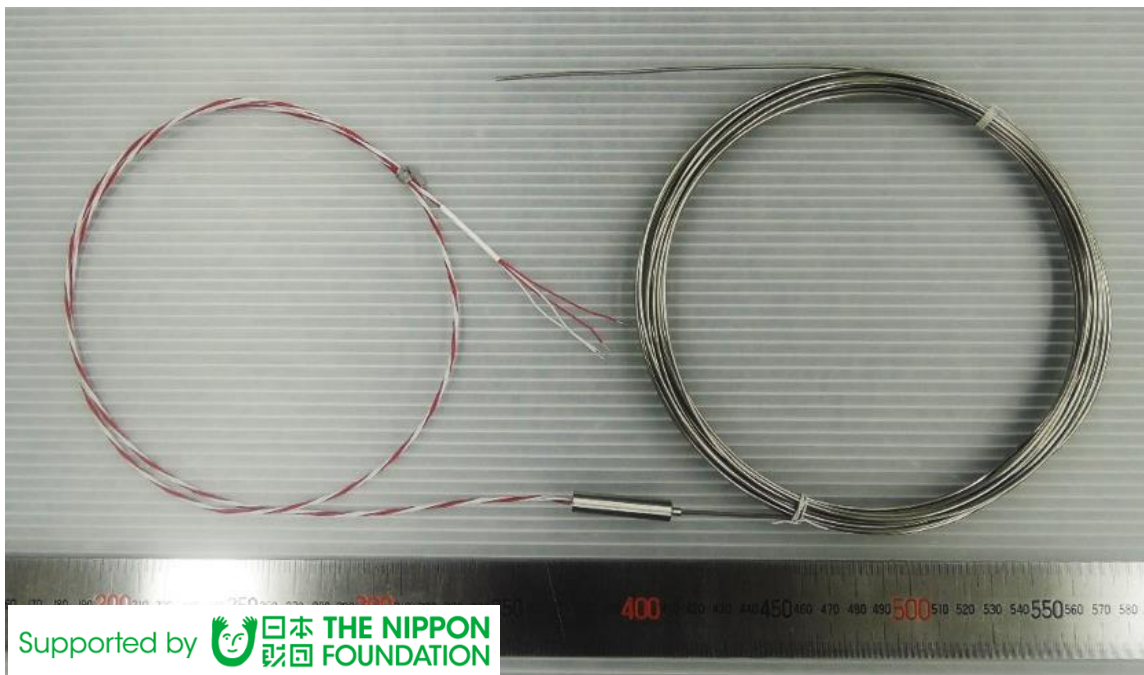


図 1 2. $\Phi 1.6\text{mm}$ プロトタイプセンサ外観
 (感温部及び導体部外径 $\Phi 1.6\text{mm}$ のシース测温抵抗体：導体部長さ 10m)



図 1 3. $\Phi 3.2\text{mm}$ 性能評価試験用センサ外観
 (感温部及び導体部外径 $\Phi 3.2\text{mm}$ のシース测温抵抗体：導体部長さ 350mm)

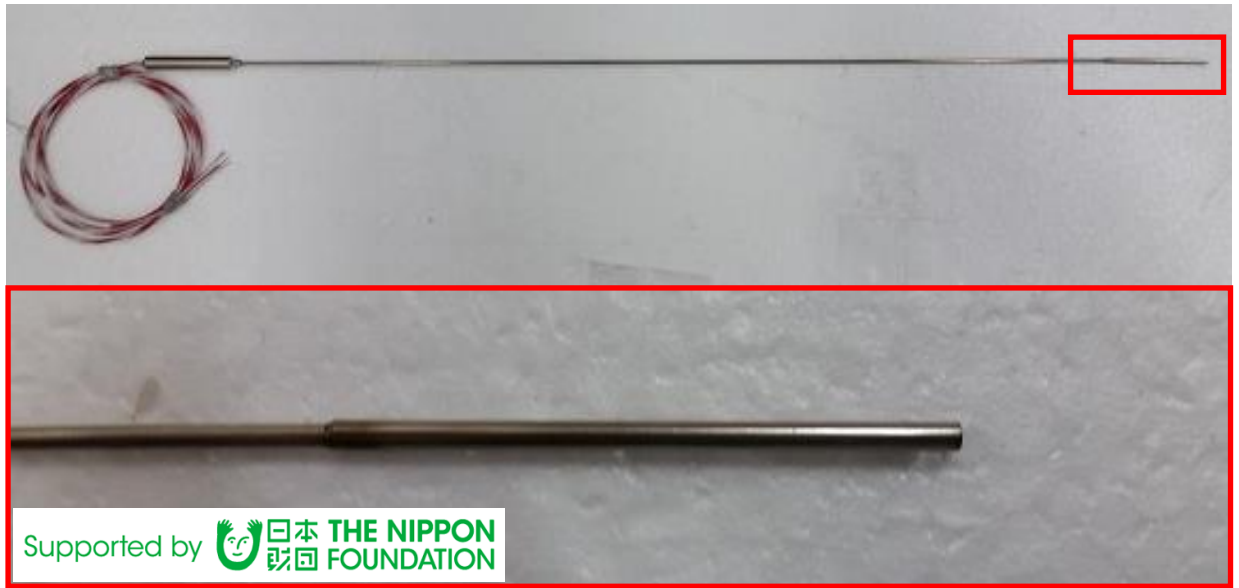


図 1 4. $\Phi 2.0\text{mm}$ 性能評価試験用センサ外観
 (感温部 $\Phi 2.0\text{mm}$ ・導体部 $\Phi 1.6\text{mm}$ のシース测温抵抗体：導体部長さ 350mm)

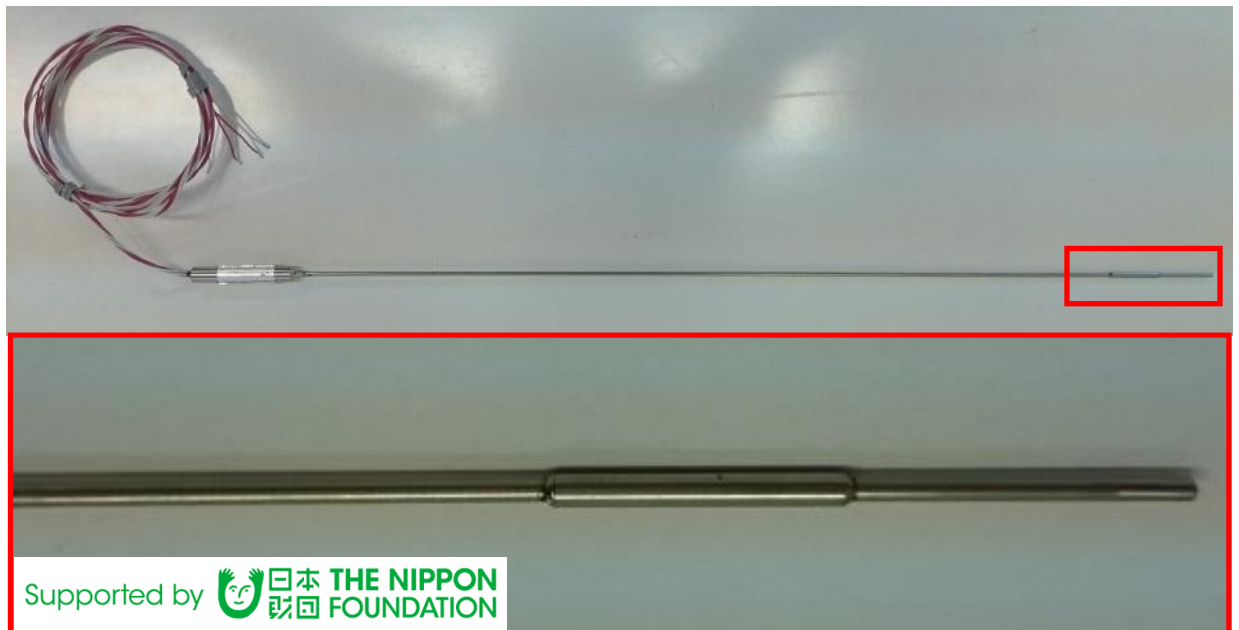


図 1 5. $\Phi 1.6\text{mm}$ 性能評価試験用センサ外観
 (感温部及び導体部外径 $\Phi 1.6\text{mm}$ のシース测温抵抗体：導体部長さ 350mm)

3.3 -253°C の超低温領域の温度計測に必要なセンサ性能

温度センサは計測する温度やその範囲、確保すべき計測精度、計測箇所の環境によって、温度計測に必要とされるセンサの性能は異なる。液体水素を温度計測の対象とした場合に求められるセンサの性能について検討し、試作したプロトタイプ温度センサを用いた評価を実施したので次に報告する。

3.3.1 LNG船用温度センサに用いられる従来技術と比較して10倍の感度向上

従来技術 Pt100Ω 白金測温抵抗体と新技術 Pt1000Ω 白金測温抵抗体(注記参照)の温度計測における感度を、実測値により比較した。

図16に示すように目標の感度向上率10倍に対して10.62倍であった。以下に-253℃の超低温領域に必要な、温度計測における感度と測温抵抗体仕様について記載する。

JIS C1604 に規格化されている工業用白金測温抵抗体の温度と抵抗のテーブルは、-200℃よりも低い温度領域は存在しない。その理由として考えられるのが抵抗値の著しい減少である。超低温である水素の沸点-253℃時に、従来技術 Pt100Ω の白金測温抵抗体が示す抵抗値は2Ω程度となる。この極小の抵抗値では計測器の確度が大きく影響するため、正確な温度計測が困難となる。一方で、一部の工業用及び研究用として利用されている-253℃時に約9.5Ωの抵抗値を保有する白金コバルト測温抵抗体(以降、Pt-Co100Ω 測温抵抗体)が存在するが、抵抗線品質の均一性が疑われること、温度センサ製作時のロー付けや溶接などの加工熱によって抵抗特性が損なわれる可能性を有することなど多くの課題を見出している。

-253℃の超低温を高精度で計測し、且つ工業用温度センサとして安定した供給をするためには、LNG船用温度センサに用いられる従来技術と比較して10.62倍の感度の向上を実現するPt1000Ω 白金測温抵抗体は最適と判断する。

【注記】 測温抵抗体：予め温度と抵抗値の関係が把握されている金属を抵抗(素子)にし、その抵抗値を測定することで温度を求める温度計。Pt1000Ω 白金測温抵抗体は白金の抵抗線を適用したもので0℃時の規準抵抗値は1000Ωとなる。

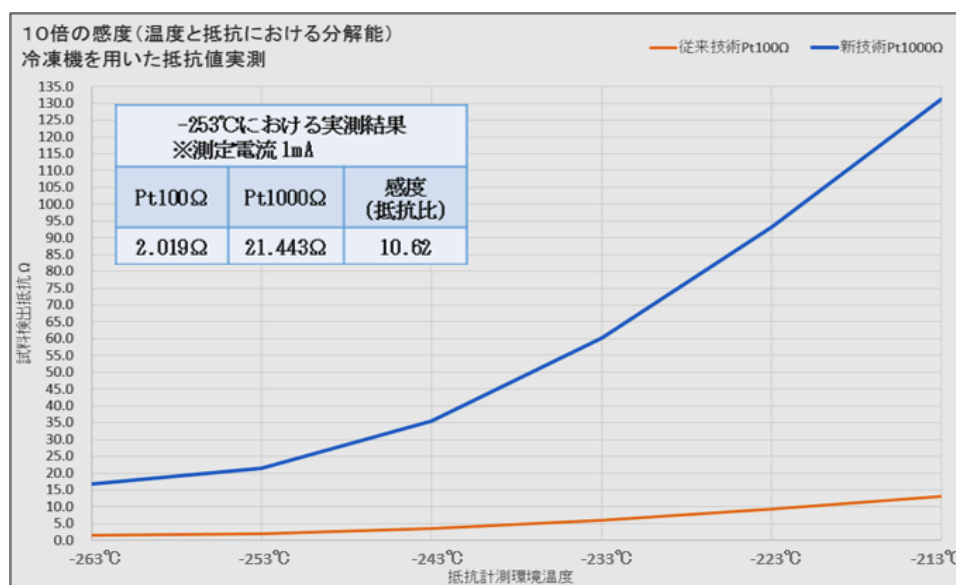


図16. 実測による温度計測の感度比較(従来技術と新技術 Pt1000Ω)

3.3.2 LNG船用温度センサに用いられる従来技術と比較して10%の応答性向上

従来技術と Pt1000Ω白金測温抵抗体の新技術の応答性を比較した結果、図17に示すように目標の10%向上に対して、実測値により200%以上の応答性の向上を確認した。

液体水素はLNG船の貨物である天然ガスよりも沸点が約90℃も低いことから、温度を計測する範囲が低温側で広がる。一般的に温度計測範囲が広いほど感温部が計測対象の温度と等しく安定した状態になることは難しくなるため、液体水素の状態を把握するために必要な温度計測精度±0.05℃の実現には優れた応答性が必要となる。

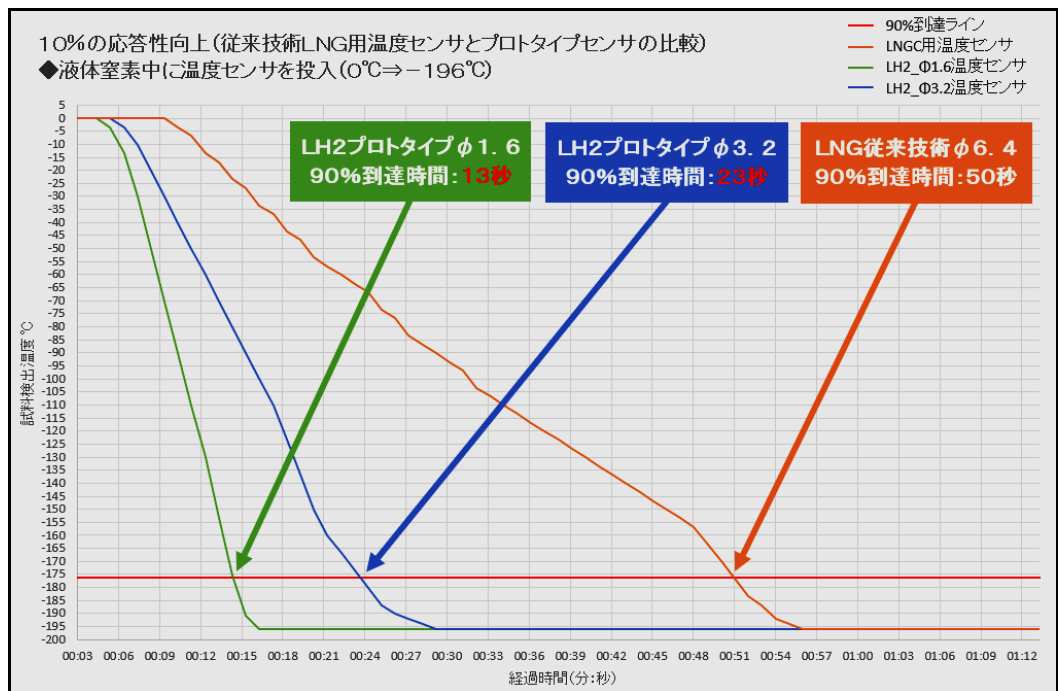


図17. 応答性の比較(従来技術LNG用センサと新技術LH2用センサ)

3.3.3 -253℃の超低温領域の温度計測に必要なセンサ性能のまとめ

3.3.1項及び3.3.2項に報告したように、超低温領域-253℃における高精度な温度計測に必要なとされるセンサ性能の向上を確認した。

LNG船用の温度センサに用いられる従来技術と比較して、10.62倍の感度と200%以上に向上させた応答性の技術的な効果について表5に記載する。

表5. 超低温-253℃の温度計測に必要なセンサ性能の実測結果と技術的効果

目標	実測結果	技術的効果
感度 10倍	従来比較 10.62倍	温度計測における感度を上げることで、水素の沸点となる超低温-253℃の温度計測を高精度で可能にする。
応答性 10%向上	従来比較 200%以上	応答性を向上させることで計測対象の温度及び温度変化に追従し、温度計測精度±0.05℃を実現する。

3.4 -253℃の超低温領域における性能評価

産業技術総合研究所の指導と協力を受け、試作したプロトタイプセンサの温度計測精度の評価方法の検討及び性能評価を実施した。

3.4.1 性能評価方法の検討

工業用温度センサとして技術的なハードルが高い温度計測精度 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ を評価するための方法を検討し、下記①から③に示す内容で評価を実施することとした。

- ① 産業技術総合研究所・省エネルギー研究部門所有の試験設備(図18参照)を利用し、温度センサを液体水素に直接投入して評価する。
- ② 温度センサの性能評価手法は比較法とし、評価基準とする温度値(以降、本報告書内では基準温度と称する)との温度差で計測精度を評価する。
- ③ 液体水素の状態や性能評価試験時の気圧によって液体水素の温度が変動するため基準温度の妥当性検証を最優先とし、妥当性が確認できた後にプロトタイプ温度センサの計測精度を評価する。

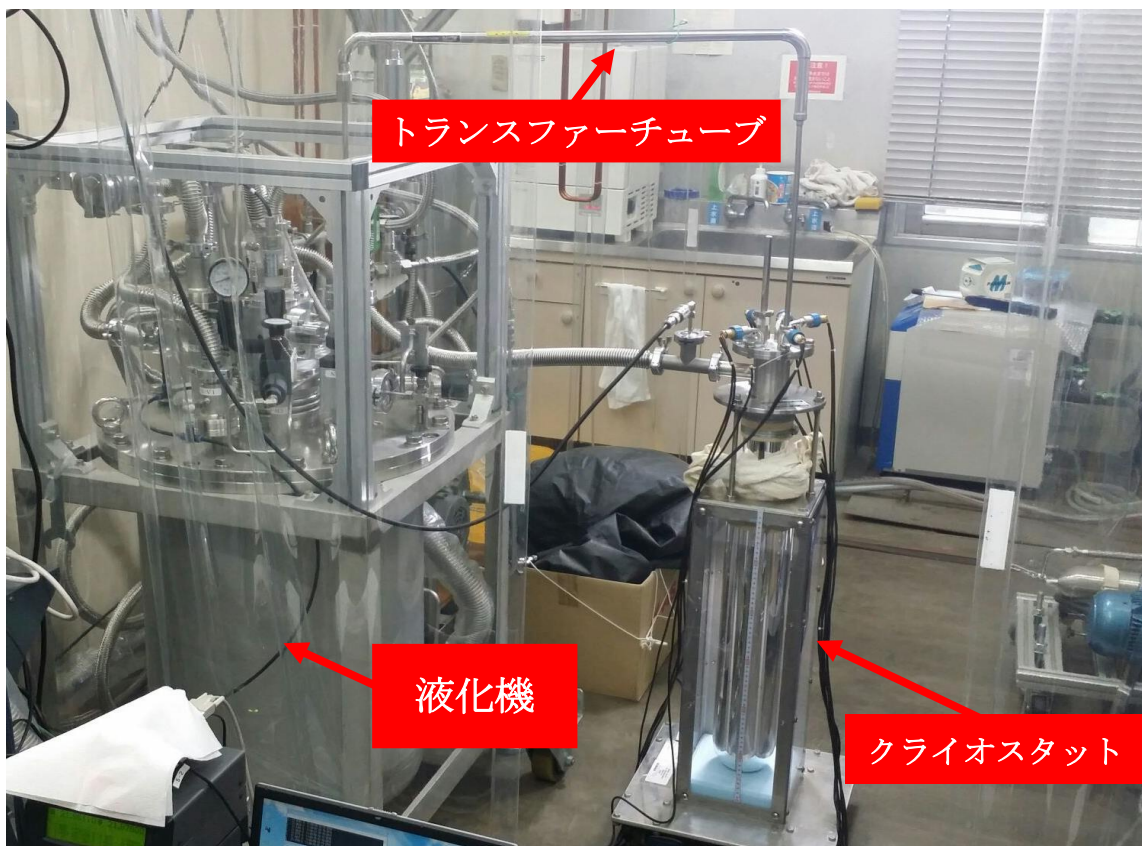


図18. 産業技術総合研究所・省エネルギー研究部門所有の試験設備

3.4.2 評価試料の温度校正

3.2 項で報告した性能評価試験用温度センサの校正を、アメリカ国立技術研究所(略称 NIST)の Pt-Co100Ω 測温抵抗体の温度と抵抗のテーブルを用いて実施した。

温度校正は図 1 9 に示す株式会社ネツシン保有の温度再現装置を用いて、-253℃を中心に-263℃から-243℃で行い、この温度範囲の内、液体水素による性能評価時に特に重要となる大気圧下の水素の沸点付近については、細かな温度レンジで校正を実施した。

なお、比較法評価の基準温度を示す測温抵抗体は、形状及び構造によっては温度計測精度の評価に対する外乱と成り得るため本来であれば抵抗素子単体が望ましいが、取扱いにより素子の損傷を招く恐れがある。そこで、図 2 0 に示すように限りなく素子に近い小型形状の測温抵抗体(以降、素子形状と称する)を製作し、性能評価試験用センサ同様に温度校正を実施した。各試料の詳細を表 6 に記載する。



図 1 9. 株式会社ネツシン所有の温度再現装置

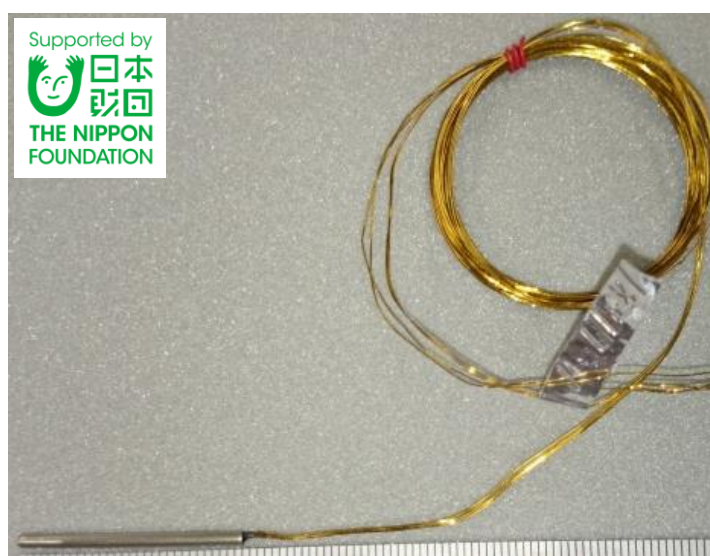


図 2 0. 素子形状試料の外観

表 6. 温度校正を実施した試料の詳細

No.	形状	仕様	特記事項 (試料形状の参照図)
No. 1	素子形状	Pt-Co100Ω 測温抵抗体	比較法評価の基準温度 (図 2 0 参照)
No. 2	素子形状	Pt1000Ω 白金測温抵抗体	Pt1000Ω 仕様そのものを評価 (図 2 0 参照)
No. 3	センサΦ3.2	Pt1000Ω 白金測温抵抗体	性能評価用プロトタイプセンサ (図 1 3 参照)
No. 4	センサΦ2.0	Pt1000Ω 白金測温抵抗体	性能評価用プロトタイプセンサ (図 1 4 参照)
No. 5	センサΦ1.6	Pt1000Ω 白金測温抵抗体	性能評価用プロトタイプセンサ (図 1 5 参照)

3.4.3 比較法評価基準となる温度値の検証

比較法評価基準となる基準温度の妥当性検証を産業技術総合研究所・計測標準研究部門の協力のもと、同研究部門が所有する極低温領域の温度計校正装置及び日本の標準温度を利用して実測し求めた。検証は、3.4.2 項表 6 の No. 1 及び No. 2 (形状は図 2 0 参照) で示した素子形状試料に加えて、これらと同じ形状・仕様のもを各々 1 本追加した計 4 本で行った。

検証結果は、温度センサの計測精度の根幹とも言える個体の温度値のばらつきが 0.01℃未満の精度であった。温度計校正装置による-253℃での評価結果の概要を図 2 1、個体の温度値のばらつきにおける概念を図 2 2 に示す。

結論として、基準温度の妥当性や Pt1000Ω 白金測温抵抗体仕様そのものが高い温度計測精度を有していることを確認し、液体水素を用いた比較法による性能評価試験の基準温度を確立することができた。

また、日本の標準温度と素子形状試料が示す温度値には微少な温度差が確認されたが、この温度差を把握することで厳密な温度計測精度の評価につなげるとともに、3.4.2 項で報告した温度校正精度の改善にもつなげる。

従って、真値となる日本の標準温度による本評価は高精度な船用液体水素用温度センサの開発にとって重要な役割を担う。

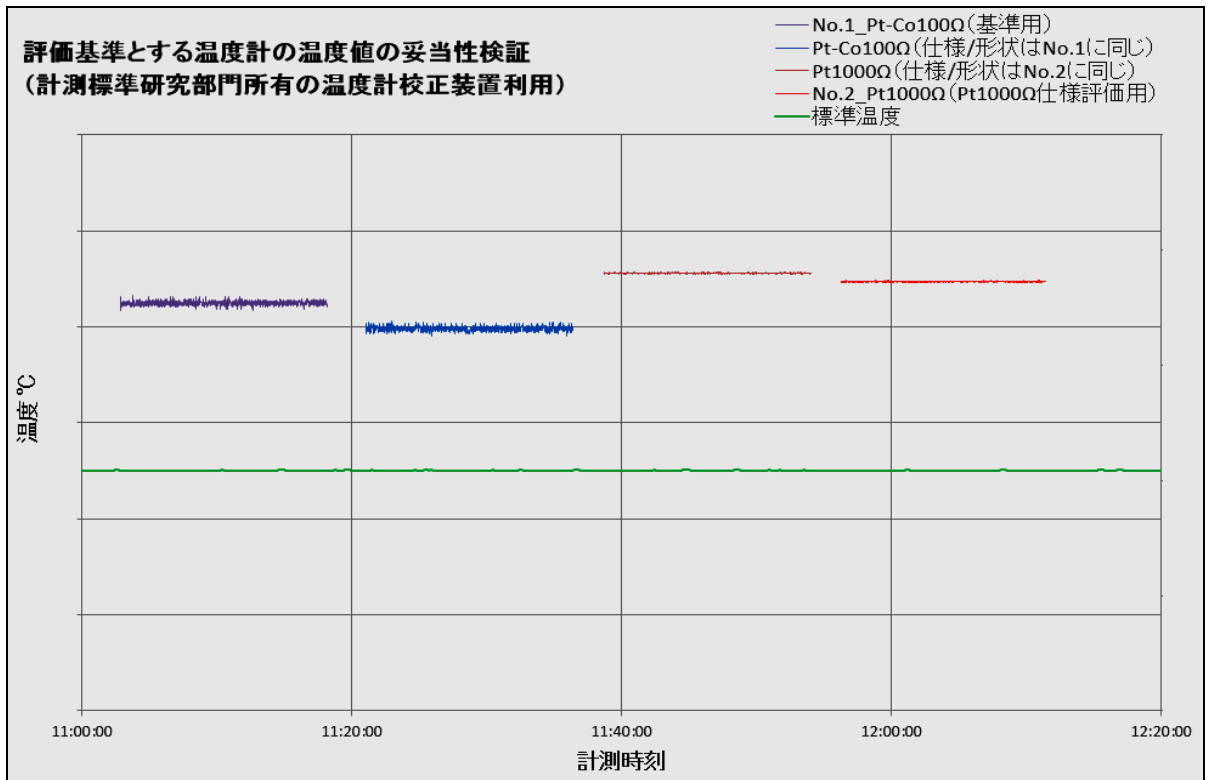


図 2 1. 不確かさ 0.0012°C (評価時) の温度計校正装置による -253°C での評価結果の概要

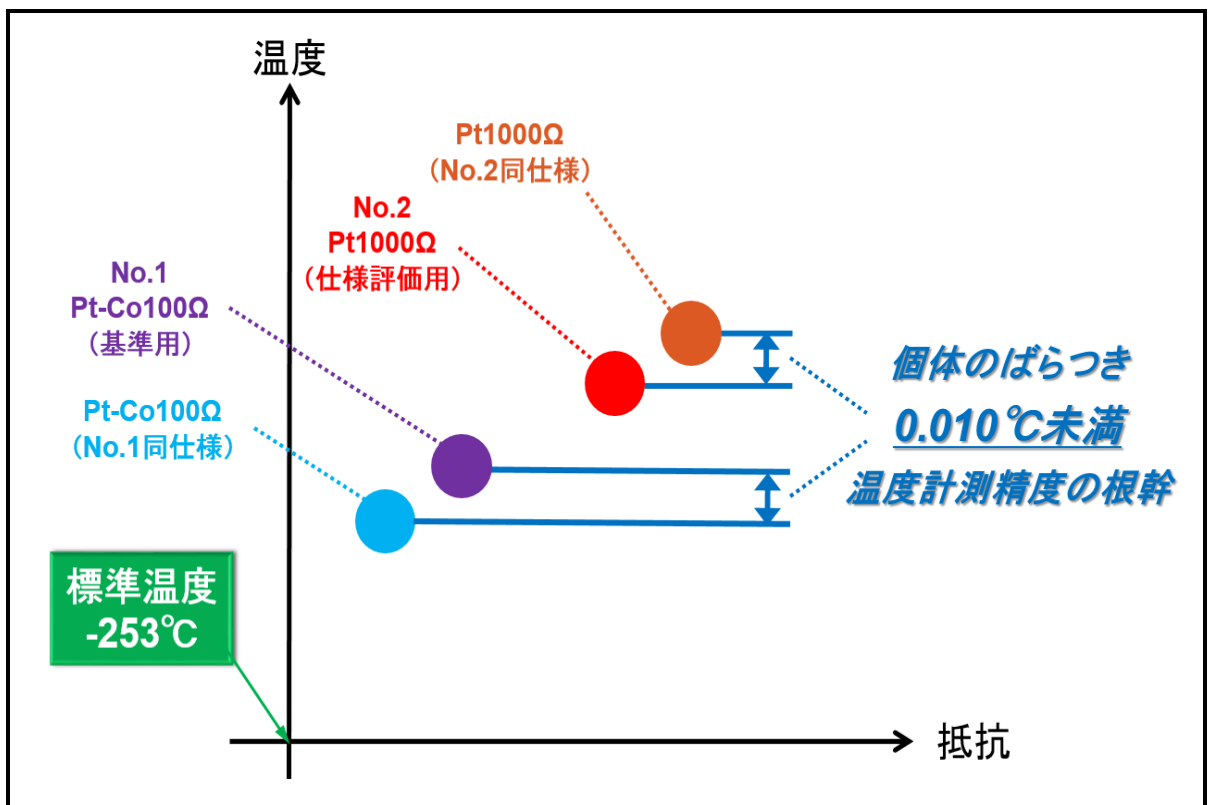


図 2 2. 個体の温度値のばらつきにおける概念図

3.4.4 液体水素を用いた評価試験

3.4.3 項に報告したように比較法の評価基準となる基準温度の検証ができたことから、実際に液体水素を用いた性能評価を実施する。性能評価試験は産業技術総合研究所・省エネルギー研究部門の指導と協力のもとに、次の①から⑤の手順にて行った。

- ① 液体水素を溜める容器であるクライオスタットに、評価する温度センサを取付ける。(図23から図25参照)
- ② クライオスタット内部を真空にし、ヘリウムガスと置換する。
- ③ クライオスタットの予冷と大気からの熱進入防止のために設けられた断熱層に液体窒素を投入する。(図26及び図27参照)
- ④ 液体水素を供給するための配管であるトランスファーチューブを経由して、液化機とクライオスタット内の圧力差を利用し、クライオスタットに液体水素を供給する。(図28参照)
- ⑤ クライオスタット内部に液体水素が溜まったことを確認し、水素の気液境界面の高さを記録しながら性能評価試験を実施する。(図29参照)



図23. 温度センサの取付け

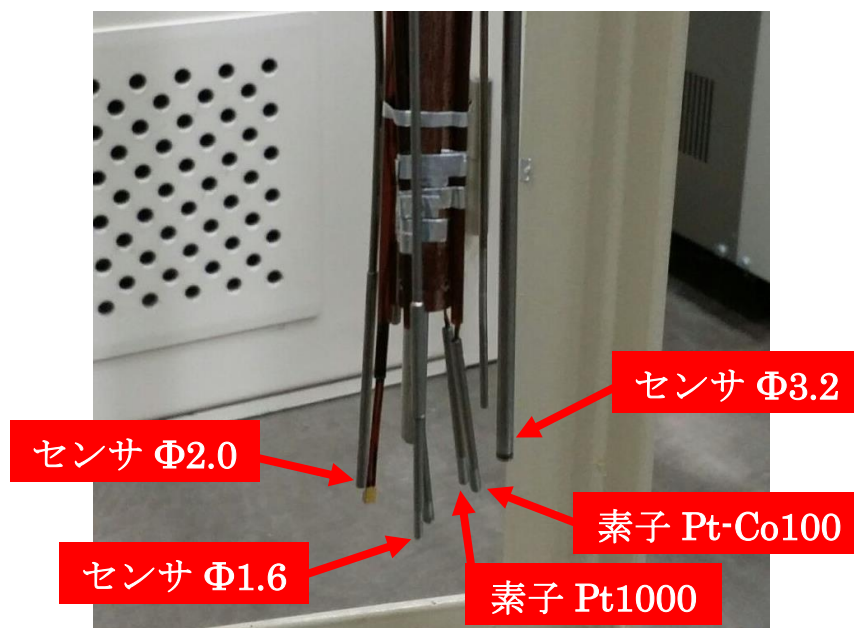


図 2 4. 温度センサの取付け詳細



図 2 5. クライオスタット(温度センサは内部に設置)



図 2 6 . クライオスタット外側に設けられた断熱層



図 2 7 . 液体窒素によるクライオスタットの予冷

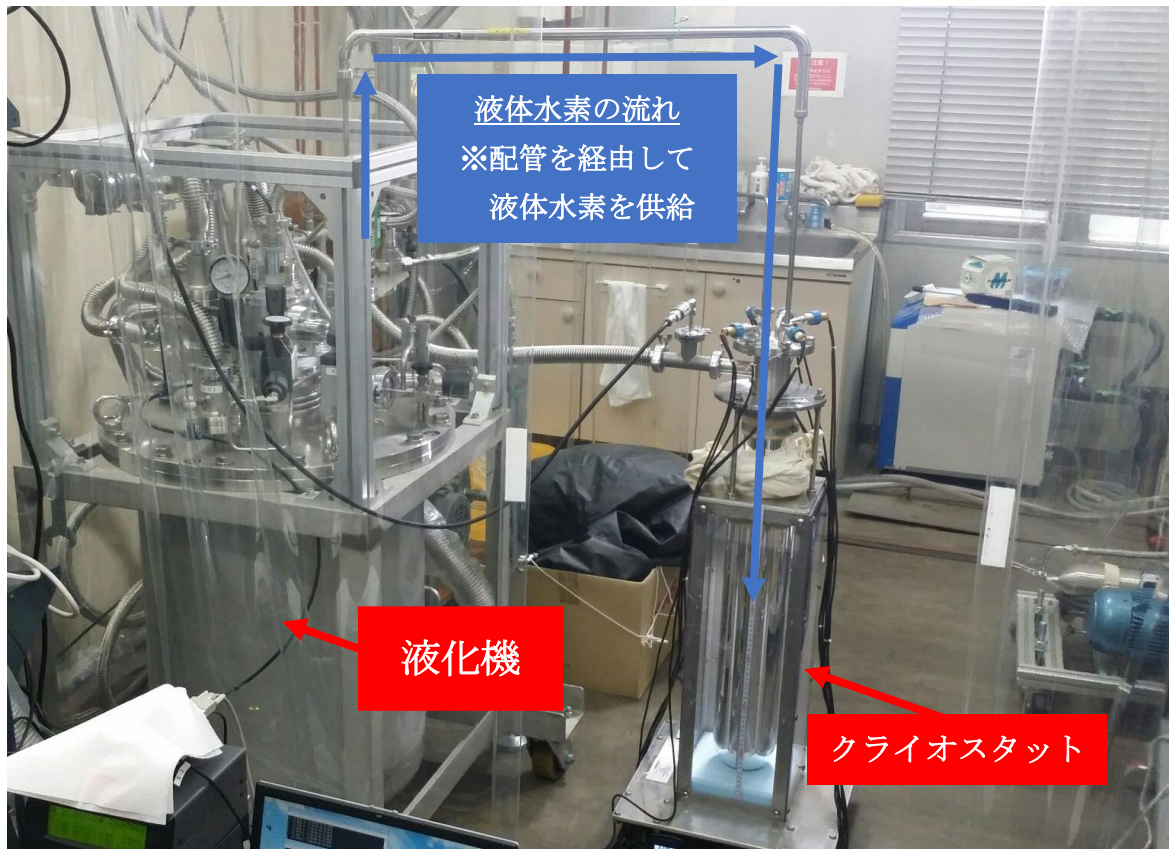


図 2 8 . 液体水素の導入

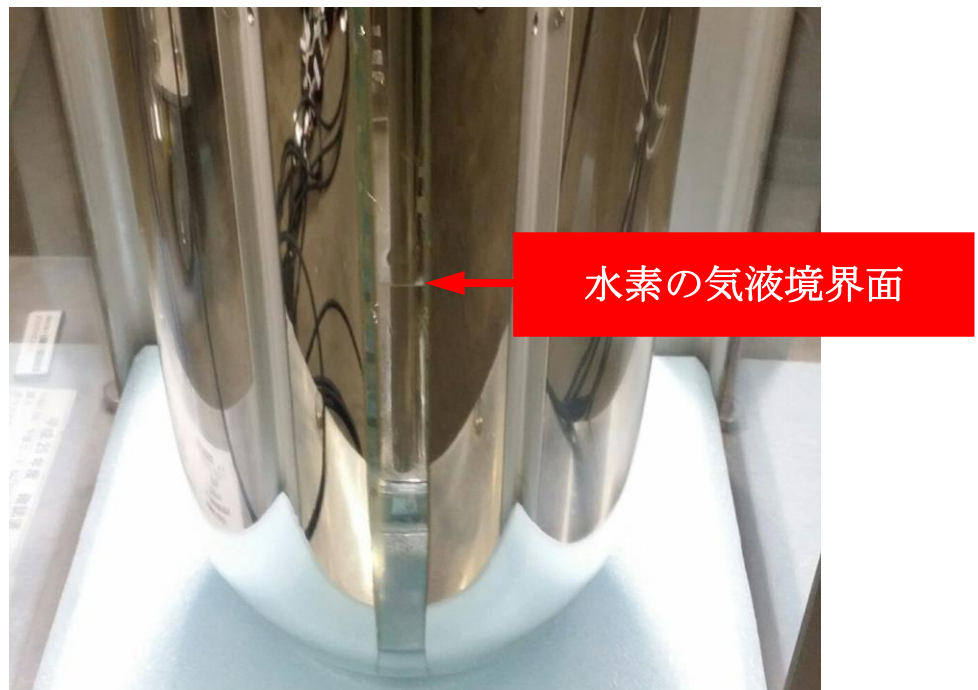


図 2 9 . 溜まった液体水素

3.4.5 温度計測精度の評価に対する外乱の調査及び検証

液体水素を用いたプロトタイプ温度センサの性能評価時に、下記①から③に示す外乱に対しての調査や検証を行い、温度計測精度の評価の妥当性を確保した。

参考として、外乱が全て影響すると仮定した場合の温度センサが検出する温度値の概要を図30に記載する。

- ① 液体水素の水頭圧によって温度センサに圧力が加わり温度値が高く計測される。
- ② 性能評価試験時の気圧変動によって液体水素の飽和温度が変動するが、温度センサの検出温度がこれに追従しない場合には誤差が生じる。
- ③ 測定電流に影響する自己加熱温度により読取り誤差が生じる。

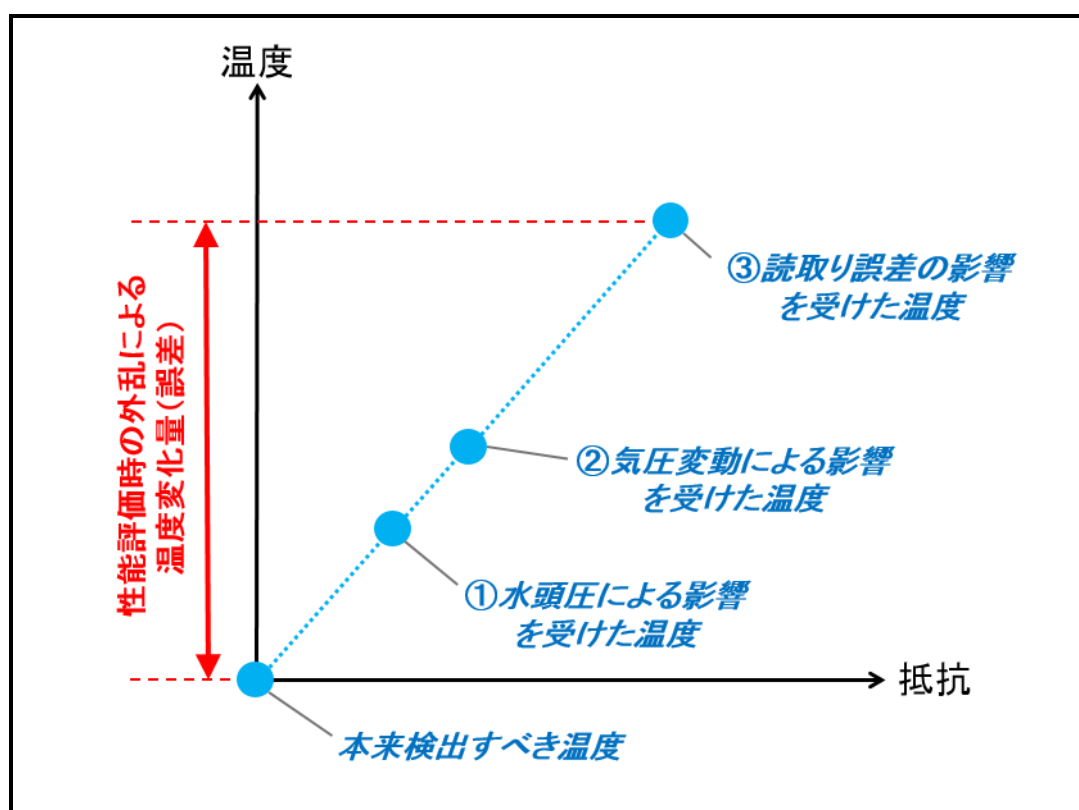


図30. 外乱が生じたと仮定した場合の温度センサの検出温度(概要図)

一般的な工業用の白金測温抵抗体は、JIS C1604 規格で定める測定電流や温度と抵抗のテーブルで精度保証されているため、上述の外乱で生じる誤差は保証されている精度内に含まれ支障はない。しかし、開発する船用液体水素用温度センサが目標とする温度計測精度は、水素の沸点 -253°C の超低温領域で $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ としており、外乱による微少な温度値の変動も無視できないため調査や検証を実施した。

1) 液体水素の水頭圧による影響調査

液体水素の水頭によって生じる圧力の大きさや温度変化量を調査した結果、液体水素を用いた性能評価試験時に 0.007℃(表 7 参照)の温度変化があることを確認した。

性能評価試験では、クライオスタット内に液体水素を溜め、評価対象の温度センサはクライオスタットの低位や中位へ設置して評価する。液体水素の高さ(深さ)により温度センサへ水頭による圧力が生じるため、温度値の変動や基準温度との誤差が生じてしまう。この液体水素の深さによって生じる圧力起因の温度値の変動や基準温度との誤差は、比較法評価に対しての外乱と成り得る。

液体水素の水頭による圧力は「液体の密度×重力加速度×高さ(深さ)」で求められ、液体水素の密度 70.8kg/m³より、異なる高さ(深さ)条件で計算した圧力と温度変化量を表 7 に記す。

表 7. 液体水素の水頭圧と温度変化量の調査

高さ(深さ)	圧力	温度変化量
1.0m	0.00069MPa	+0.023℃
0.5m	0.00035MPa	+0.012℃
0.4m	0.00028MPa	+0.009℃
0.3m	0.00021MPa	+0.007℃
0.2m	0.00014MPa	+0.005℃
0.1m	0.00007MPa	+0.002℃

※性能評価時の液体水素の最大高さ(深さ)は 0.3m 程度

2) 気圧変動による飽和温度変化に対する検証

液体水素を用いた性能評価試験時に、気圧変動によって生じる飽和温度変化に対する基準温度の追従を検証した。

図 3 1 に示すように、比較法の評価基準となる Pt-Co100Ω 測温抵抗体(3.4.2 項表 6 の No. 1)が示す基準温度は、約 0.001℃の誤差で飽和温度変化に正確に追従していた。これにより液体水素による性能評価試験において、気圧変動による外乱を取り除けるものと判断した。

大気圧環境下での液体水素を用いた性能評価試験では、気圧の変動によってクライオスタット内の液体水素には飽和温度変化が生じる。比較法による性能評価試験において、基準温度を示す Pt-Co100Ω 測温抵抗体の検出する温度値が、気圧変動による飽和温度変化に追従しない場合には、この温度差の分だけ誤差が生じ評価結果の妥当性が損なわれる。

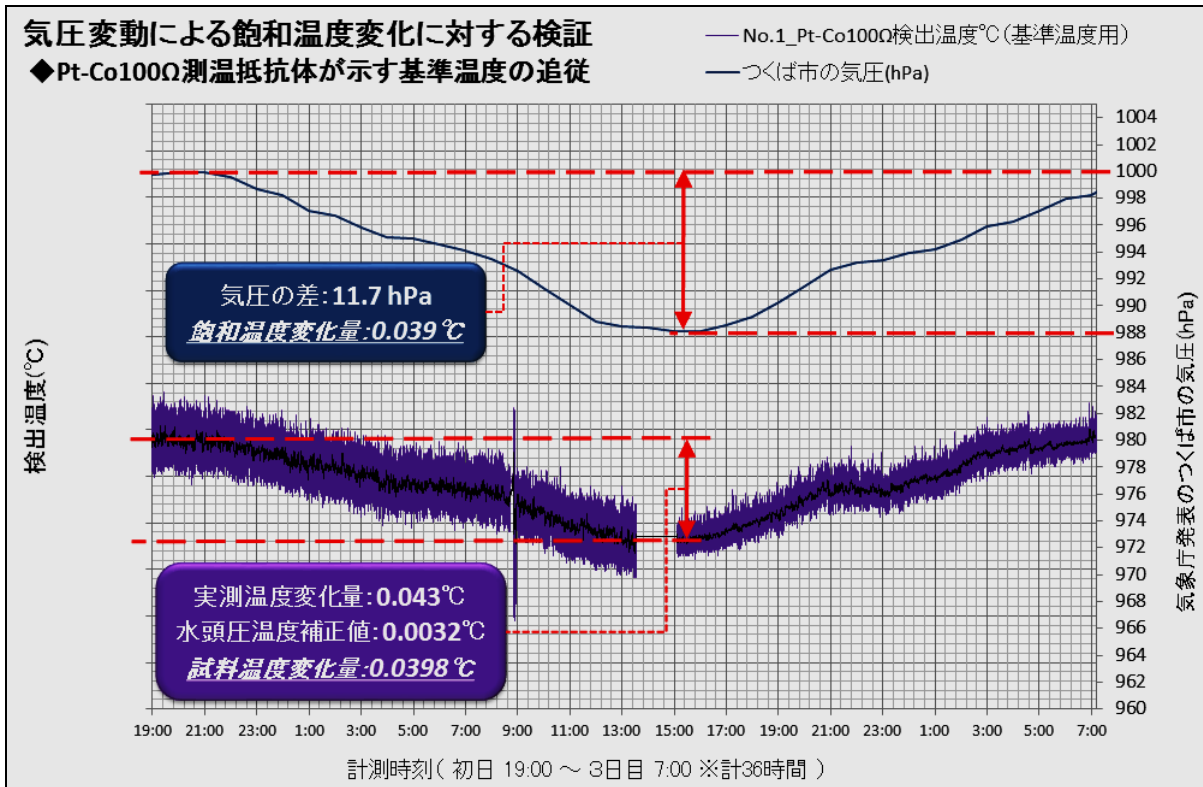


図 3 1. 気圧変動によって生じる飽和温度変化への基準温度の追従

3) 測定電流による読取り誤差の検証

測定電流による読取り誤差の検証方法として、プロトタイプセンサを液体水素に直接投入した状態で、温度センサの自己加熱温度を評価した。

表 8 に評価した自己加熱温度を利用して検証した、測定電流による読取り誤差の検証結果を示す。検証の結果、従来技術と比較して 10 倍の感度向上のための測定電流 1mA は読取り誤差の小さい安定した温度計測が実施できること、計測機器から温度センサに流す測定電流の精度は±6% (0.94mA~1mA~1.06mA) であれば高精度な温度計測に支障をきたさないことを確認した。

測温抵抗体は抵抗素子に電流を流し、計測対象の温度変化にともなって変動する抵抗値をもとに温度換算を実施して温度値を求める。抵抗素子内にある白金抵抗線に電流が流れるとジュール熱が発生するため温度センサが加熱する。これを自己加熱と呼び、測定する電流値の 2 乗に比例し一次曲線で現すことが出来る。自己加熱温度の量は測温抵抗体の構造や計測環境にも依存するが、計測機器側から流す電流の精度や大きさに影響を受け、読取り誤差(精度誤差)の要因と成り得る。

一般的な温度計測精度(例として 0°Cにおいて許容差±0.15°C)の工業用の白金測温抵抗体では自己加熱は問題とはならないが、-253°Cの超低温領域において±0.05°Cのような高い温度計測精度を求める場合には自己加熱が問題となるため、測定電流による影響を予め把握、この影響を包含したセンサの温度校正を実施して、白金測温抵抗体の固体毎のばらつきを抑制する必要がある。

従って、実際に液体水素にプロトタイプセンサを投入して測定電流に影響する自己加熱温度を評価することが最も望ましいと判断した。

表 8. 測定電流による読取り誤差の検証結果

プロトタイプセンサ 感温部の外径寸法	測定電流による読取り誤差		
	0.94mA	1mA	1.06mA
Φ 1.6mm	<i>-0.003°C</i>	0	<i>+0.003°C</i>
Φ 3.2mm	<i>-0.006°C</i>	0	<i>+0.006°C</i>

※1mA を基準(誤差 0)とした時の測定電流精度±6%による検出温度への影響を報告

4) 温度計測精度の評価に対する外乱の調査及び検証のまとめ

-253°Cの超低温領域における温度計測精度を評価するにあたり、調査及び検証した液体水素による性能評価試験時の外乱への対応を以下①から③に纏めた。これら外乱に対応し、実際に液体水素を用いた基準温度との比較法による温度計測精度の評価を繰り返し行うこととした。

- ① クライオスタット内に設置した温度センサの位置と水素の気液境界面までの距離を把握して、水頭圧によって生じる温度変化量を補正する。
- ② 気象庁発表の気圧を確認、計測も実施し、気圧変動にともなう飽和温度変化に対して基準温度が追従していることを確認した後、温度計測精度を評価する。
- ③ 液体水素を用いて評価した測定電流に影響する自己加熱温度の影響を包含したセンサの温度校正を実施する。

3.4.6 プロトタイプセンサの温度計測精度の評価

産業技術総合研究所・省エネルギー研究部門の指導の下、3.4.4項に報告した手順にて液体水素を用いた性能評価試験を実施した。

評価試験の目的は温度計測精度の評価であり、3.4.3項に示す日本の標準温度と比較して検証した基準温度(3.4.2項表6内 No.1のPt-Co100Ω測温抵抗体)との比較法で評価を実施した。また、温度計測精度の評価及びセンサの温度校正時には、3.4.5項で述べた外乱への対応を全て実施した。詳細を実測結果とともに次に記す。

1) 温度計測精度の評価結果

試作した船用液体水素用プロトタイプ温度センサの計測精度が設計段階で決定した精度±0.05°Cを満足すること、Pt1000Ω白金測温抵抗体仕様そのものが高い温度計測精度を有することを実証した。

基準温度との比較法による評価結果として、最大誤差を有したΦ1.6プロトタイプセンサでは「-0.047°C」、Pt1000Ω白金測温抵抗体の素子形状試料では「+0.006°C」

の誤差であった。実測データの概要を図 3 2 から図 3 6、詳細な評価結果を表 9 に記載する。

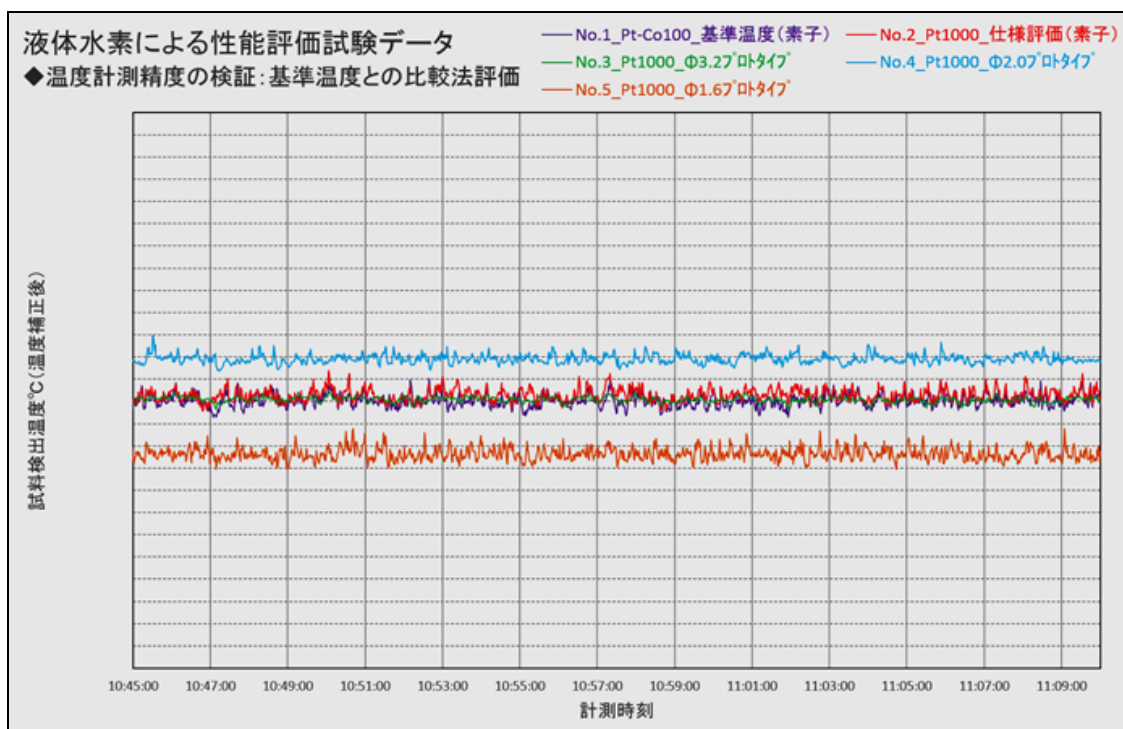


図 3 2. 基準温度と各評価試料の計測データ比較

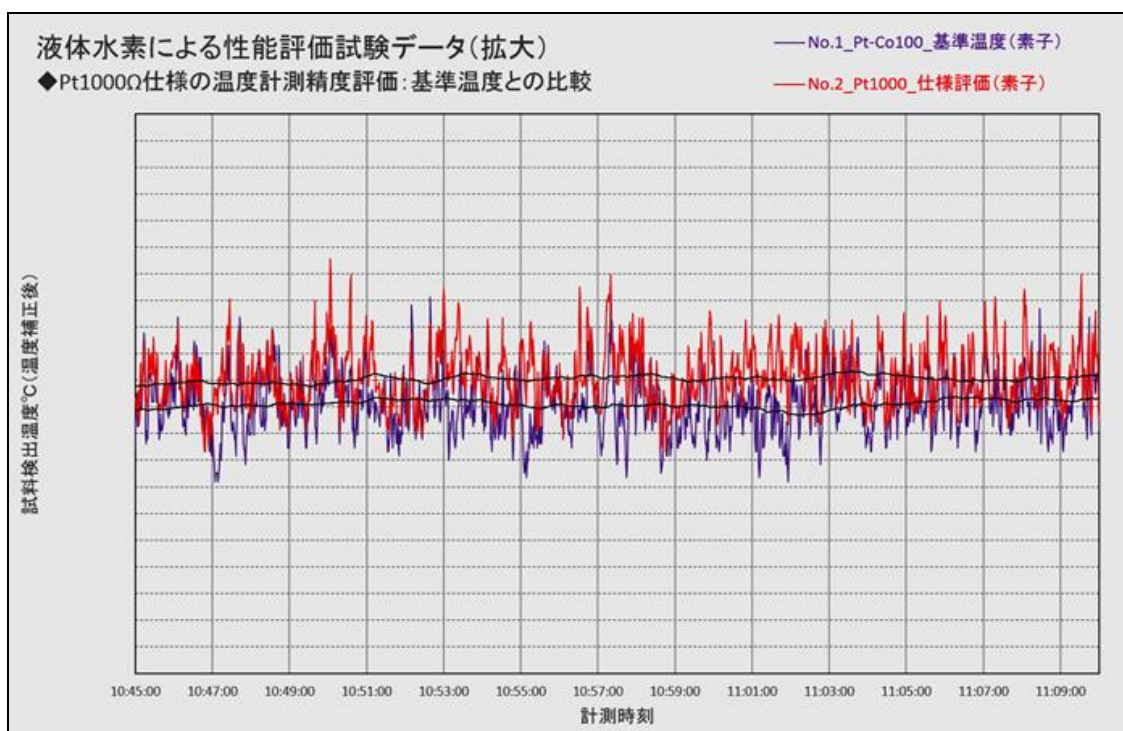


図 3 3. 基準温度と Pt1000 Ω 素子形状試料の計測データ概要(拡大)

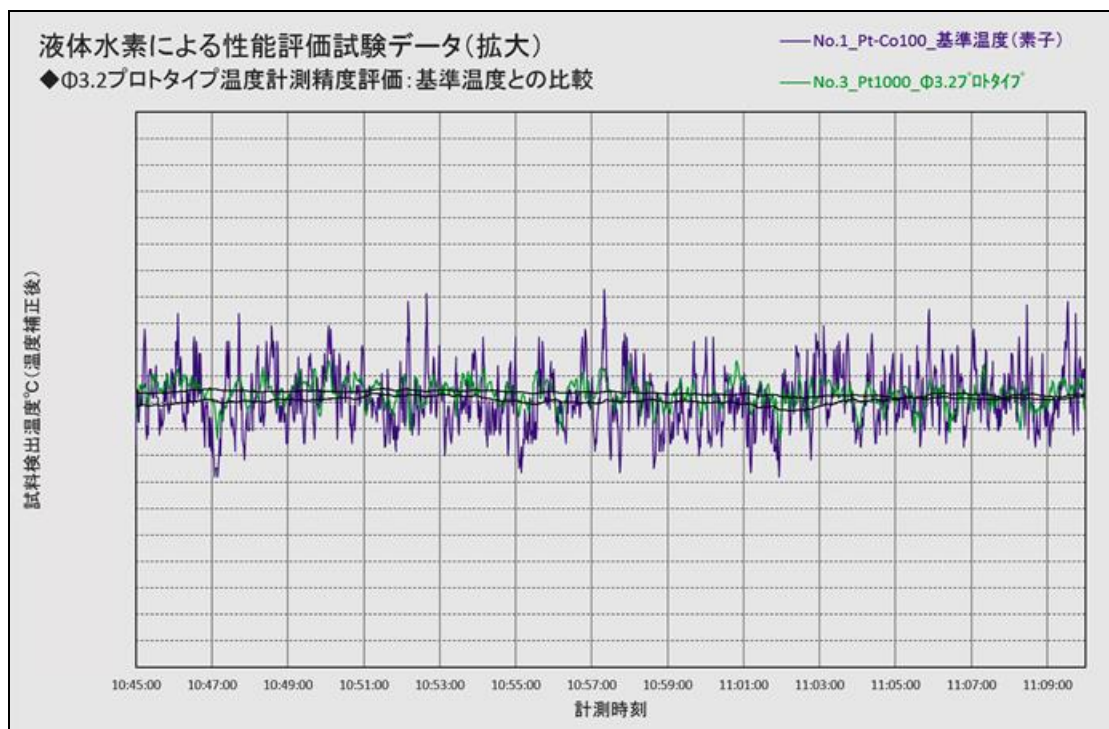


図 3 4. 基準温度と Φ3.2mm プロトタイプ温度センサの計測データ概要(拡大)

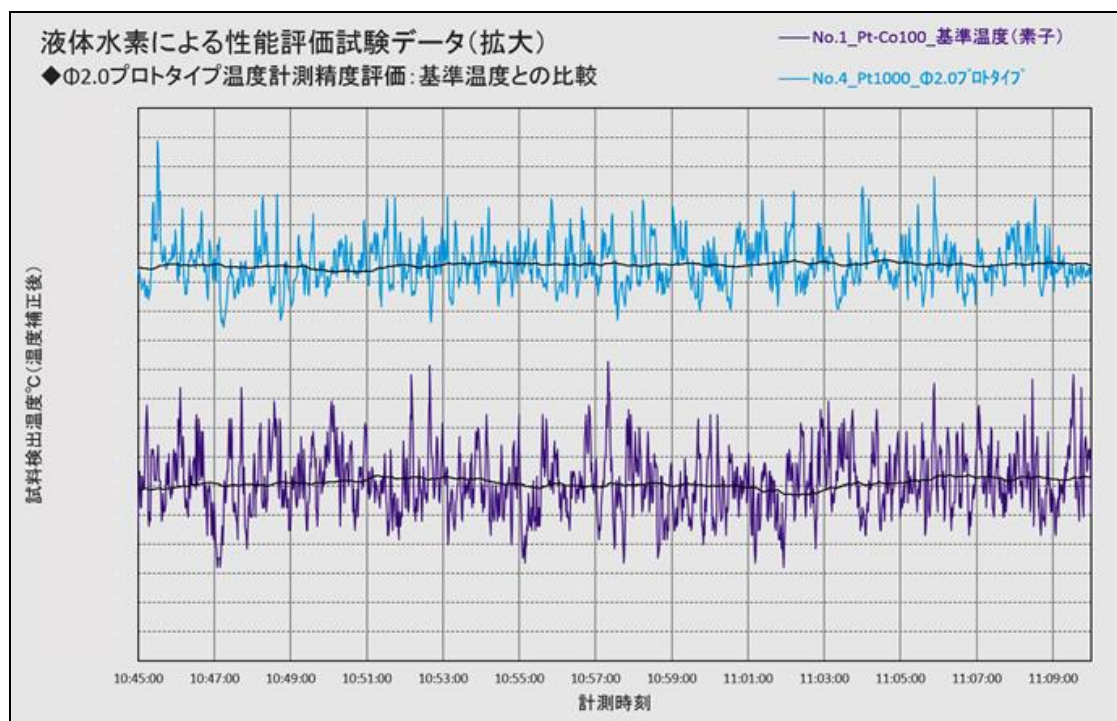


図 3 5. 基準温度と Φ2.0mm プロトタイプ温度センサの計測データ概要(拡大)

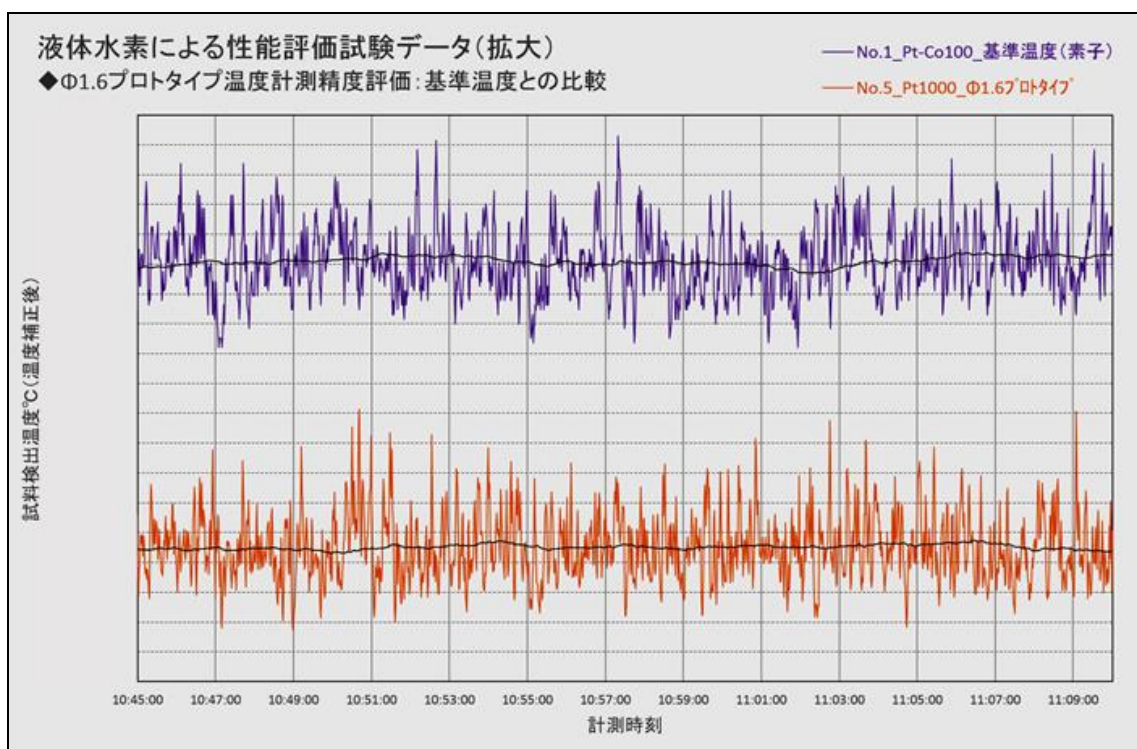


図 3 6 . 基準温度と Φ1.6mm プロトタイプ温度センサの計測データ概要(拡大)

表 9 . 液体水素による温度計測精度の評価結果

No.	形状	仕様	基準温度との温度差(誤差)
No. 1	素子形状	Pt-Co100Ω 測温抵抗体	基準温度
No. 2	素子形状	Pt1000Ω 白金測温抵抗体	+0.006℃
No. 3	センサ Φ3.2mm	Pt1000Ω 白金測温抵抗体	+0.003℃
No. 4	センサ Φ2.0mm	Pt1000Ω 白金測温抵抗体	+0.038℃
No. 5	センサ Φ1.6mm	Pt1000Ω 白金測温抵抗体	-0.047℃

2) 温度センサの感温部から水素の気液境界面までの距離と温度計測結果

図 3 7 に外形上、顕著な差異のある感温部外径 Φ1.6mm と Φ3.2mm の温度計測データを示す。ほぼ同じ位置に感温部が位置するように設置したが、Φ3.2mm プロトタイプ温度センサは水素の気液境界面が感温部に近づく以前から緩やかな温度上昇が生じ、センサの熱容量の大きさによって温度計測結果に差異があることを確認した。

この実測結果より、外部からの入熱による影響を受け蒸発しやすい液体水素を温度計測の対象とする場合、3.1.1 項 8) の温度センサの設計要件(表 4 参照)で述べたとおり、センサ形状を小型化して熱容量を限りなく抑制することは必須事項であると判断した。

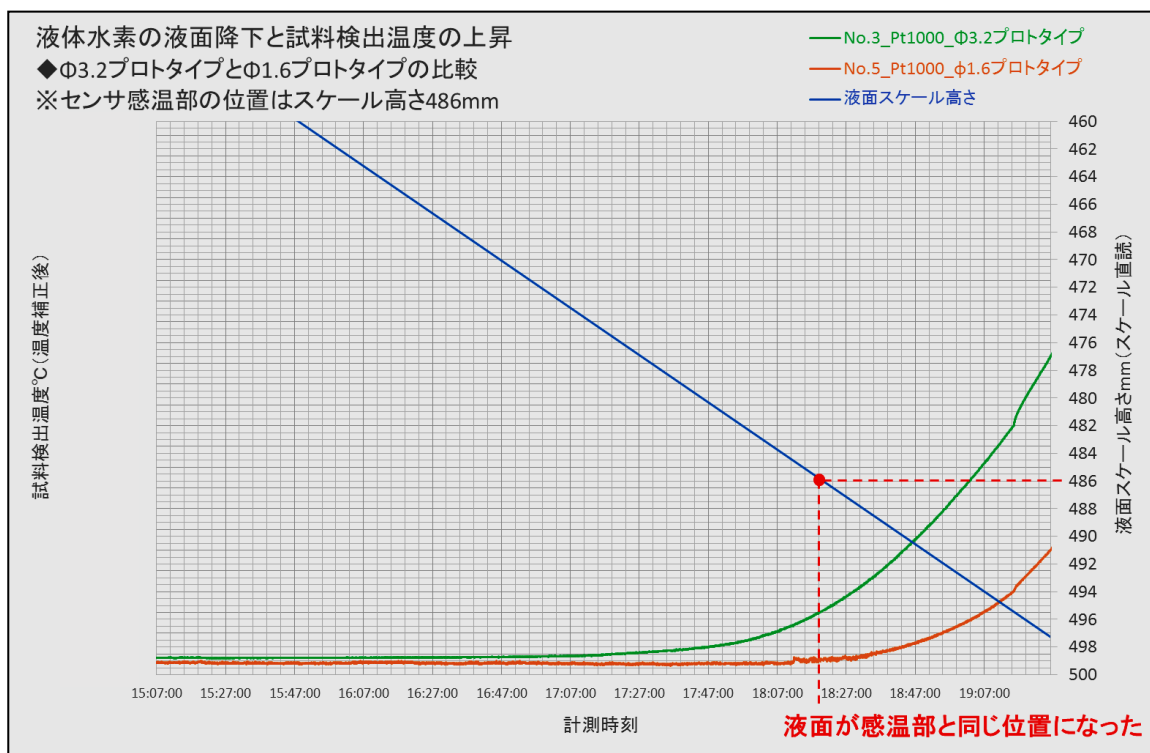


図 3 7. 液体水素の液面降下と試料検出温度の上昇

※液面スケール高さは数値が小さいほど液体水素が多い(深い)ことを示す。

3. 4. 7 液体水素-253℃による熱負荷前後のプロトタイプセンサの性能検証

温度センサの性能を確保し続ける上で最も過酷な環境条件「常温から水素の沸点である-253℃までの温度差約 300℃にて生じる熱負荷」によって、温度センサの性能が劣化し、検出する温度値が変動していないかを検証した。

液体水素に温度センサを投入する試験の都度、試験前後で 0℃と-196℃の 2 つの温度における性能検査を実施した。その結果、JIS C1604 で定める Class A を満足する性能を温度センサが維持していることから、本事業で開発したプロトタイプ温度センサは、超低温領域-253℃までの熱負荷を受けても性能が劣化しないことを確認した。表 1 0 に性能検査結果を記載する。

更に、3. 4. 3 項に記載した日本の標準温度による検証を再度、同一試料で実施した。液体水素を用いた複数回の試験前後において、温度センサの検出する温度値はほぼ変化していないことから、温度計測精度の比較法評価の妥当性を確保するとともに、Pt1000 Ω 白金測温抵抗体が実用に耐えうる性能を有していることを確認した。

船用の温度センサは容易に交換出来ない(特にインタンク用温度センサは、緊急時を除いて修繕ドック時以外は交換されない)ことから、船用液体水素用温度センサで最も求められるべき性能である温度計測精度は、長期的に維持されなければならない。

これまでの 3. 1 項から本項までに報告した通り、平成 2 7 年度の目標(2. 2 項①参照)に掲げた、LNG 船用温度センサに用いられる従来技術と比較して 10 倍の感度と 10%

向上させた応答性を実現する船用液体水素用温度センサの設計及び試作、並びに-253℃の超低温領域における温度計測精度の評価を実施完了した。

表 10. 液体水素を用いた試験前後における 0℃と-196℃の温度計測における性能検査

No.	詳細	氷点(0℃)による検査		液体窒素(-196℃)による検査	
		検査結果	ClassA 合否	検査結果	ClassA 合否
No. 3	試験前(-253℃の熱負荷前)	±0.15℃未満	合格	±0.54℃未満	合格
	試験後(-253℃の熱負荷後)	±0.15℃未満	合格	±0.54℃未満	合格
No. 4	試験前(-253℃の熱負荷前)	±0.15℃未満	合格	±0.54℃未満	合格
	試験後(-253℃の熱負荷後)	±0.15℃未満	合格	±0.54℃未満	合格
No. 5	試験前(-253℃の熱負荷前)	±0.15℃未満	合格	±0.54℃未満	合格
	試験後(-253℃の熱負荷後)	±0.15℃未満	合格	±0.54℃未満	合格

※1. 0℃の JIS C1604 が定める Class A の精度範囲：±0.15℃以内

※2. -196℃の JIS C1604 が定める Class A の精度範囲：±0.54℃以内

3.5 温度センサ素子への通電回路の設計

温度センサが装備される目的は計測対象の温度監視である。求められる最も重要な性能は温度計測精度であり、寿命は計測する温度値が使用期間においてその精度を維持できる期間と置き換えられる。

温度センサ素子への通電回路の設計を通じて、温度センサの長寿命化と温度監視システムとしての精度を検討した。

3.5.1 温度センサ素子に印加される突入電流の調査

下記に示す温度センサの長寿命化の妨げとなる要因を分析し、温度計測回路が関係する要因を検討した結果、システム電源の投入時(温度計測開始時を含む)に過渡的に生じる過電流(以降、突入電流と称する)が、温度検出端に装備されている温度センサ素子に流れてセンサ性能の劣化を招く恐れがあると判断した。

- ① 航行時の波浪によって生じる動揺や推進機関及び発電機関に起因する振動による衝撃力を温度センサが受ける。
- ② 液体水素を貨物として扱うためタンク内の液面の変化による膨張、収縮を伴う熱的な負荷を温度センサが受ける。
- ③ 温度計測回路の電源投入時に定格としている電流値以上の過大な突入電流が温度センサ素子に流れる。

突入電流による詳細を次に記載する。一般的な電気機器において、図38に示すようにシステム電源の投入直後に定格とした電流値を超える突入電流が流れることがある。この突入電流は、図39に示す温度センサ内部の直径十数μmオーダーの極細の白金抵抗線の結線部にそのまま流れ、結果として温度センサ素子の性能劣化を招く恐れがある。

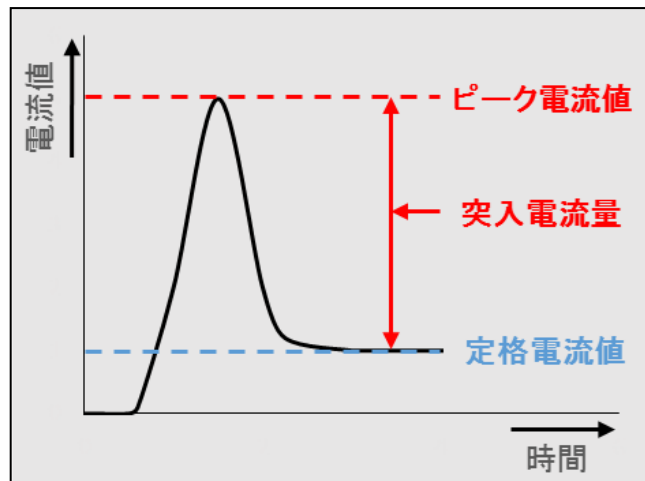


図 3 8 . 温度センサ素子に流れる突入電流の概要

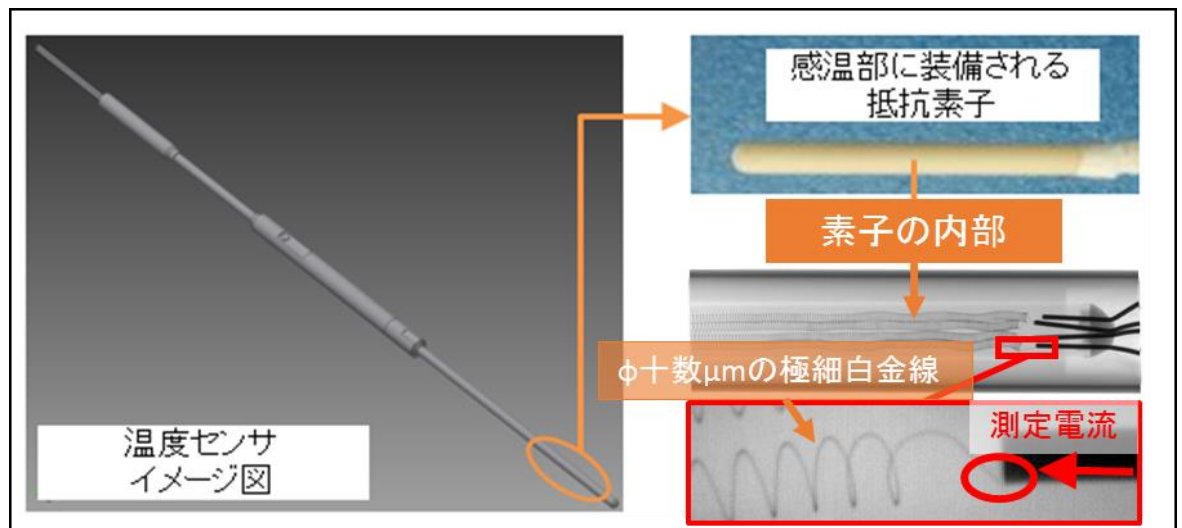


図 3 9 . 温度センサ内部の詳細

1) 突入電流の調査方法の検討

突入電流の調査方法を検討し、液体水素の温度計測時の状況に合わせる目的で、水素の沸点 -253°C 時に船用液体水素用温度センサが示す抵抗値、液体水素運搬船が適用する温度センサへの定格電流 1mA を調査のための試験条件とした。

なお、計測回路については液体水素運搬船が適用する定格電流 1mA と同じ測定電流の従来 LNG 船で用いられている温度計測回路(以降、現行計測モジュールと称す)を用いることとした。検討した突入電流の調査方法を次に記載する。

- ① 液体水素の沸点である -253°C で船用液体水素用温度センサが示す抵抗値相当の 21.6Ω の固定抵抗(図 4 0 参照)を適用する。
- ② 温度計測回路は、現行計測モジュール(図 4 1 参照)を適用する。
- ③ オシロスコープで、固定抵抗に印加される電圧と DC24V 電源の電圧を計測する。(図 4 2 参照)

- ④ 計測回数は10回とし、10回の電圧計測値の平均値を採用する。
- ⑤ 計測した電圧値をオームの法則($I=V/R$ 下記注記参照)を用いて電流値に換算し、この電流値の平均によって評価を行う。

【注記】ピーク電流値（突入電流）の算出例

計測したピーク電圧値 $229\text{mV} \div$ 固定抵抗 $21.6\ \Omega \approx$ ピーク電流値 10.6mA

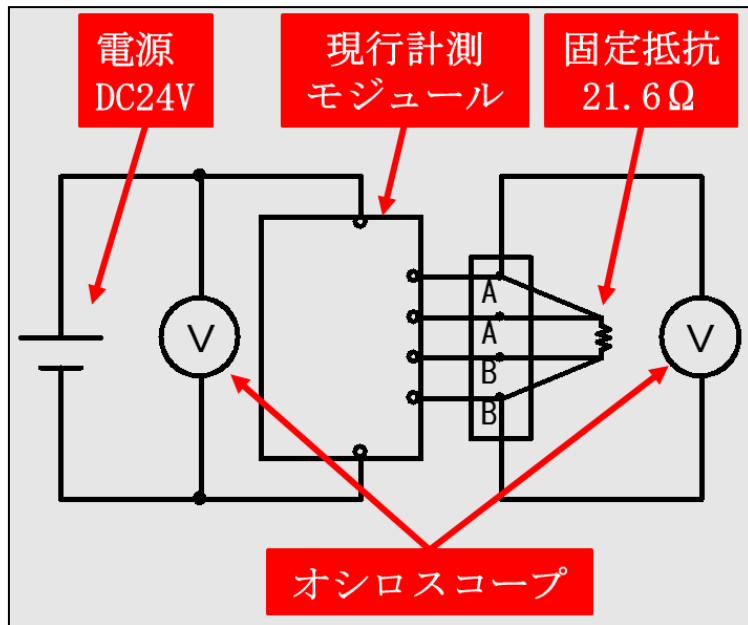


図40. 突入電流計測回路の概要図



図41. 現行計測モジュール



図42. 突入電流計測の回路構成概要

2) 突入電流の調査結果

3.5.1 項 1) に述べた方法により調査した結果、突入電流の大きさを示すピーク電流値の平均値は 11.2mA となり、表 1 1 に示すように定格電流 1mA に対して約 11 倍の電流が液体水素の温度計測時にセンサへ通電されることがわかった。また、オシロスコープにて最大のピーク電圧値 303mV (電流値 14.0mA) を計測したときの波形データを図 4 3 に示す。

表 1 1. 固定抵抗への印加電圧より算出したピーク電流値

計測回数 (回)	電圧値 (mV)	電流値 (mA)
1	229	10.6
2	266	12.3
3	255	11.8
4	303	14.0
5	251	11.6
6	248	11.5
7	140	6.5
8	246	11.4
9	247	11.4
10	241	11.2
平均値	243	11.2

※固定抵抗 21.6Ω は-253℃時に温度センサが示す抵抗値と等しい。

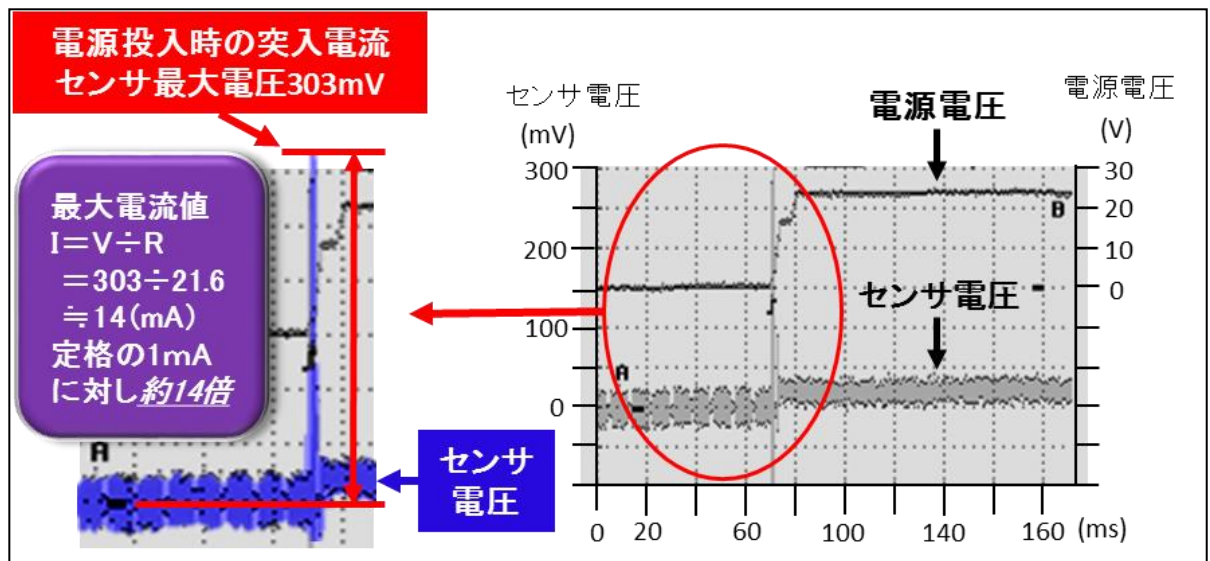


図 4 3. 最大電圧値 303mV 計測時の波形データ

3) 温度センサ素子に印加される突入電流の調査まとめ

3.5.1 項2)で報告した通り計測回路に電源を投入した直後に発生する突入電流が、表11に示すとおり平均値11.2mAとなり定格電流1mAに対して約11倍に達することがわかった。この突入電流が温度センサの寿命及び性能に影響を及ぼすか否かを検証する必要があると判断した。

3.5.2 加速試験による突入電流の影響評価

温度センサの寿命や性能に対する突入電流の影響について、加速試験を実施して検証した。詳細を次に報告する。

1) 評価方法の検討

液体水素運搬船が適用する定格電流1mAにおいて、システム電源の投入時に定格電流1mAの約11倍もの電流が、温度センサに突入電流として流れることがわかった。この突入電流が温度センサの寿命及び性能に影響を及ぼすか否かを評価する加速試験の方法を検討したので次に示す。

- ① 加速試験に用いる試験品センサは、図20に示す素子形状のPt1000Ω白金測温抵抗体を適用し、試験本数は4本とする。
- ② 図44及び図45に示す回路で加速試験を実施する。本試験回路は、電源を投入するとタイマが作動し、2秒ON、2秒OFFの動作を繰り返す。このタイマに連動してリレーが2秒ON、2秒OFFの動作を繰り返す。リレーの出力信号で現行計測モジュールの電源を、ON、OFFさせ強制的かつ連続的に突入電流を発生させる。
- ③ 温度値の計測は、計測時の不確かさが少ない図46に示す1990年国際温度目盛(以降、ITS-90)で定められた定義定点「水の三重点0.01℃(1つの物質の気相・液相・固相が同時に共存して熱平衡にある状態)」を適用する。
- ④ 試験前に水の三重点0.01℃により温度センサの抵抗値を計測し、この抵抗値を初期値とする。
- ⑤ 加速試験の環境温度は液体水素の沸点-253℃を適用し、株式会社ネツシン保有の温度再現装置を借用してこの温度を再現する。
- ⑥ -253℃を保持しながら電源ON、OFF動作を計10000回繰り返すことで突入電流をともなった加速試験を実施する。(液体水素運搬船においてシステムの電源投入を1日1回、約30年繰り返すことを想定し10000回とした)
- ⑦ 電源ON、OFF動作を1回、5000回、10000回繰り返した後に、水の三重点0.01℃により温度センサの抵抗値を計測する。本試験の評価は、試験前の初期値と試験後の抵抗値から温度変化量を算出し、温度変化量の最大値にて評価する。

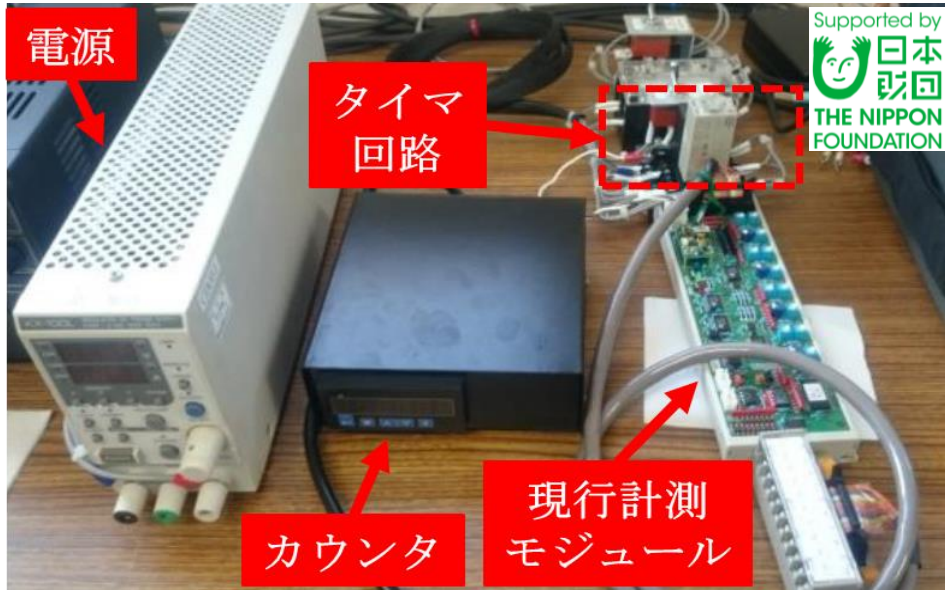


図 4 4. 加速試験の回路構成概要

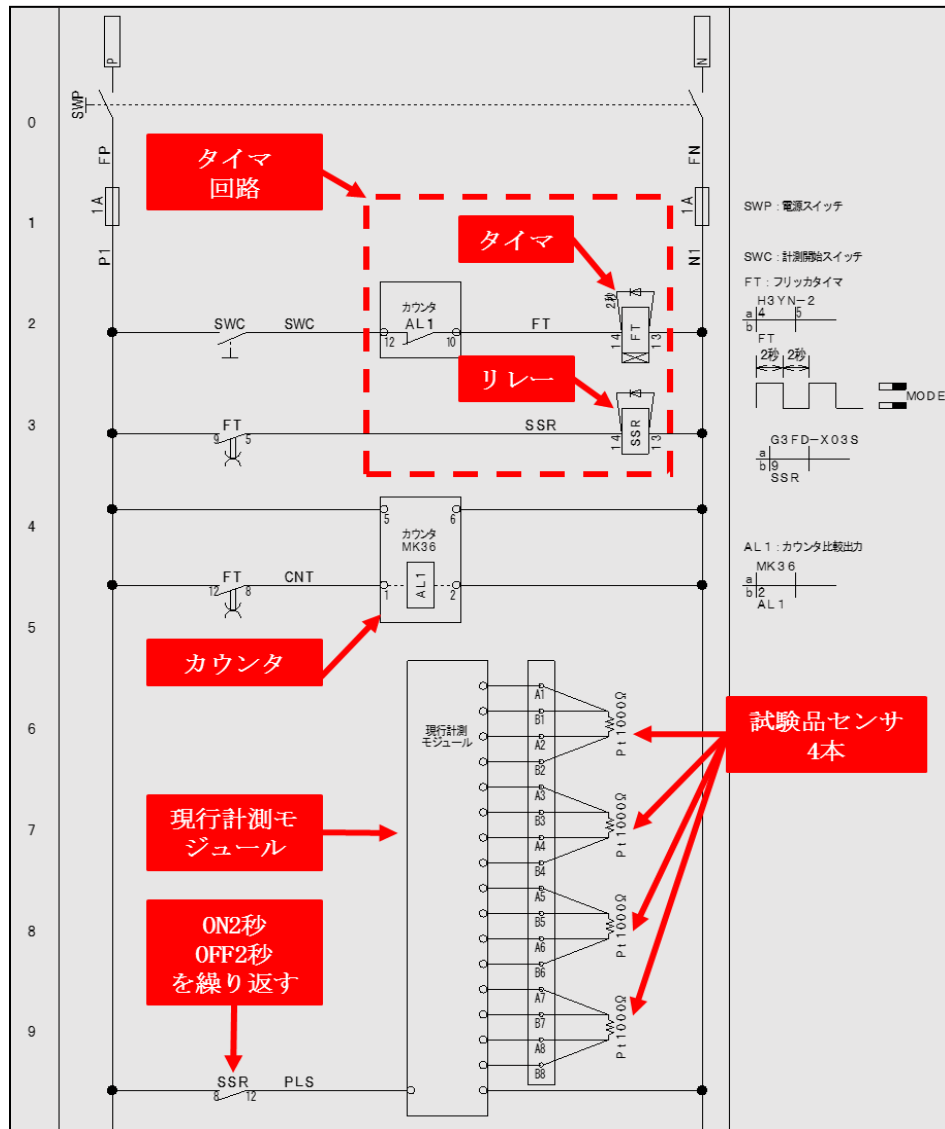


図 4 5. 加速試験の回路図

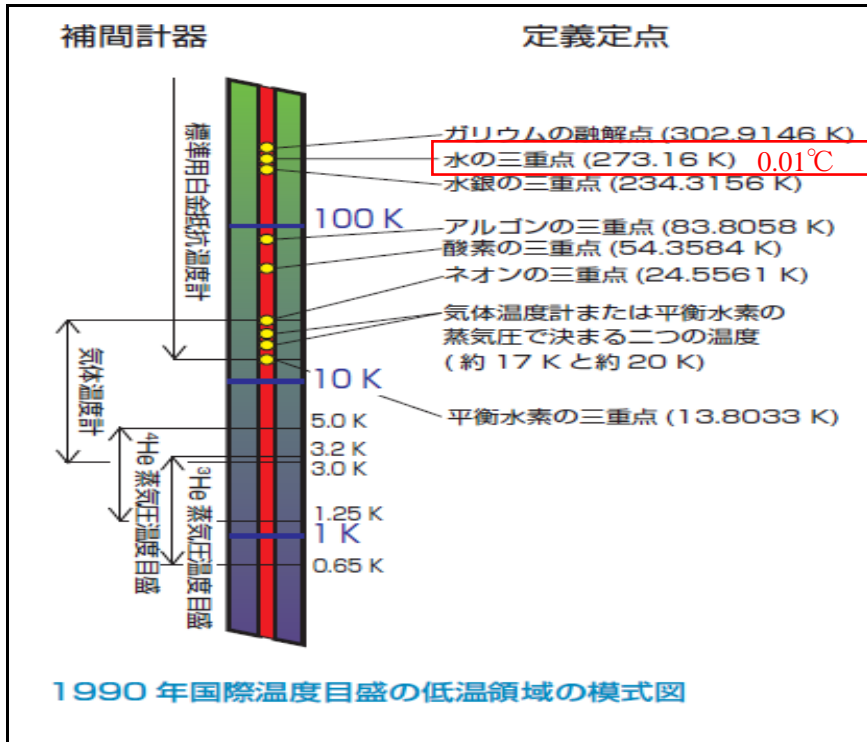


図 4 6 . ITS-90 で定められた国際温度目盛

2) 加速試験結果

3.5.2 項 1) で報告した方法により、突入電流による温度センサへの影響を調査するための加速試験を実施した。

4 本の試験品 (Pt1000 Ω 白金測温抵抗体) における加速試験時の水の三重点を用いた抵抗値計測及び温度変化量の算出結果を表 1 2、加速試験前を初期値として温度変化量の推移を表したグラフを図 4 7 に示す。

加速試験を実施した各試験品において、初期値から 10000 回後の温度変化量が一番大きな試験品 (表 1 2 の試験品センサ 2 参照) でも、 -0.0023°C と極めて微少な温度変化量であることを確認した。

表 1 2 . 水の三重点による抵抗値及び温度変化量の計測

繰返し回数	試験品センサ1		試験品センサ2		試験品センサ3		試験品センサ4	
	抵抗値 (Ω)	温度変化 (°C)	抵抗値 (Ω)	温度変化 (°C)	抵抗値 (Ω)	温度変化 (°C)	抵抗値 (Ω)	温度変化 (°C)
初期値	999.62000	-	999.70258	-	999.49174	-	999.85184	-
1	999.61853	-0.0004	999.69589	-0.0017	999.49287	0.00030	999.84776	-0.0010
5000	999.61990	0.0000	999.69349	-0.0023	999.49390	0.00054	999.84633	-0.0014
10000	999.61897	-0.0003	999.69340	-0.0023	999.48976	-0.00053	999.84669	-0.0013

※表内の「温度変化」欄には、初期値と各繰返し回数後の抵抗値の差を温度換算したものを示す。

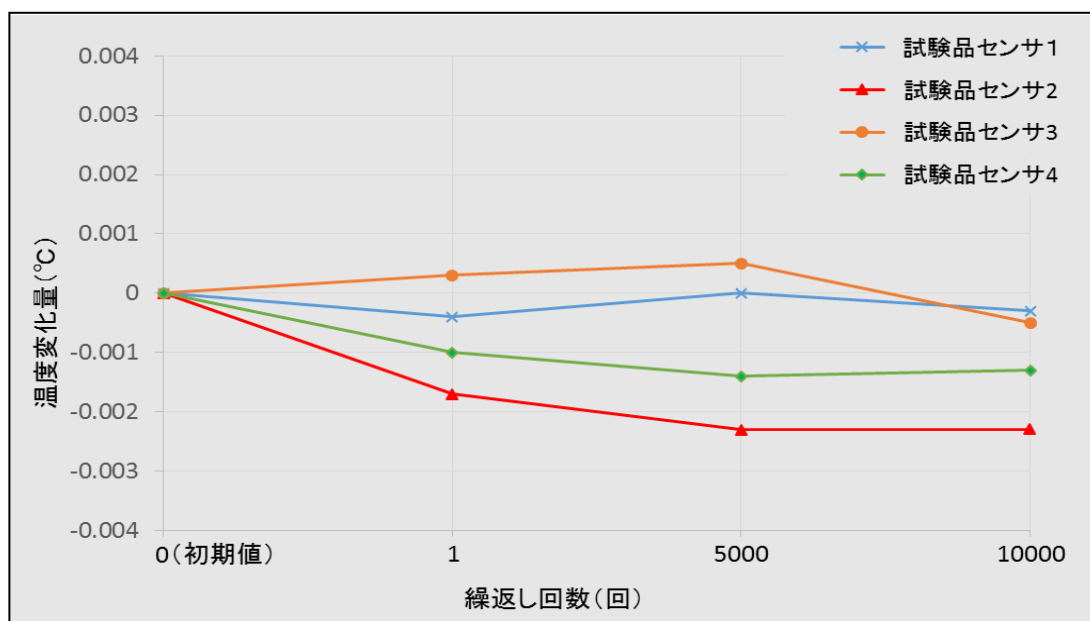


図 4 7. 水の三重点による温度計測精度の評価グラフ

3) 加速試験による突入電流のまとめ

液体水素運搬船が適用する定格電流 1mA に対して約 11 倍の突入電流が温度センサへ流れる加速試験を実施した結果、最大の温度変化量は微少な -0.0023°C であり、3.1 項の船用液体水素用温度センサのプロトタイプ設計で検討した温度計測精度 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ に対して 5%未満の温度変化量であった。従って、突入電流が温度センサの寿命や性能に及ぼす影響は無視できるものと判断した。

3.5.3 突入電流を抑制する通電回路設計

3.5.2 項 3) に報告したように、突入電流が温度センサの寿命や性能に及ぼす影響は無視できるものと判断するが、突入電流の抑制は温度センサの寿命をより延長するため、突入電流を抑制する通電回路を設計した。

温度計測回路(システム)の電源投入時や計測開始時には、まず 0.1mA の測定電流を温度センサ素子に通電させる回路とした。この場合 3.5.1 項で確認された定格電流に対して約 11 倍の突入電流が発生したとしても、 $0.1\text{ mA} \times 11\text{ 倍} = 1.1\text{ mA}$ となる。即ち、3.5.1 項にて確認された突入電流の平均値 11.2mA に対して突入電流を約 90%抑制できる回路である。現行計測モジュールと新規計測モジュール(以降、マイクロプロセッサと称す)の突入電流の比較を図 4 8 に示す。

また、水素の沸点 -253°C 付近の超低温領域における温度計測は、計測精度を確保するため 1mA の測定電流を温度センサに通電させるが、その他の温度領域の測定電流については 0.1mA を適用し、温度センサの自己加熱を抑制して極細の白金抵抗線への熱的な負荷を軽減する通電回路設計とした。図 4 9 にマイクロプロセッサにおける測定電流の切換えフロー図を示すとともに、このフローに準拠した液体水素の温度計測のための測定電流の切換え動作例を表 1 3 に記載する。

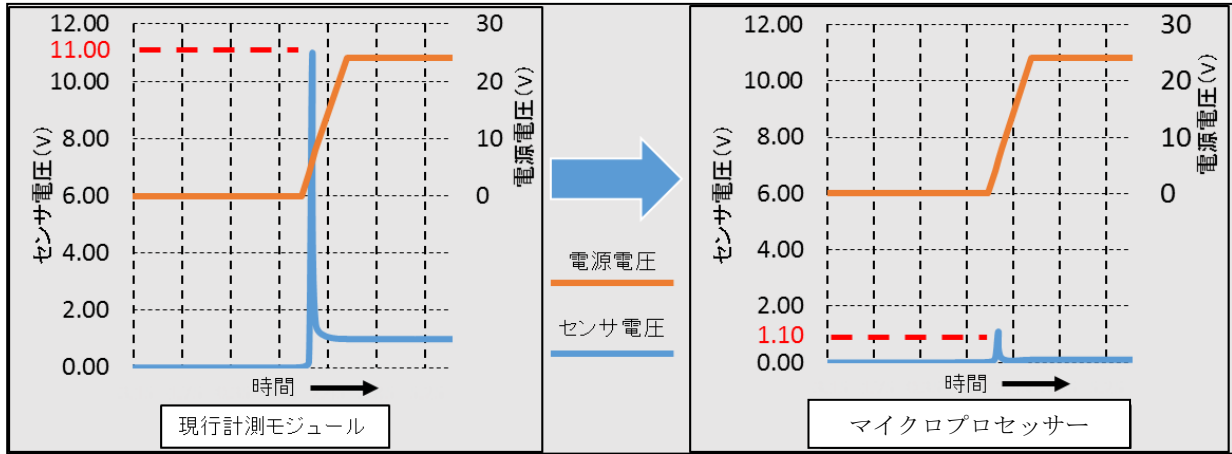


図 4.8. 現行計測モジュールとマイクロプロセッサの突入電流

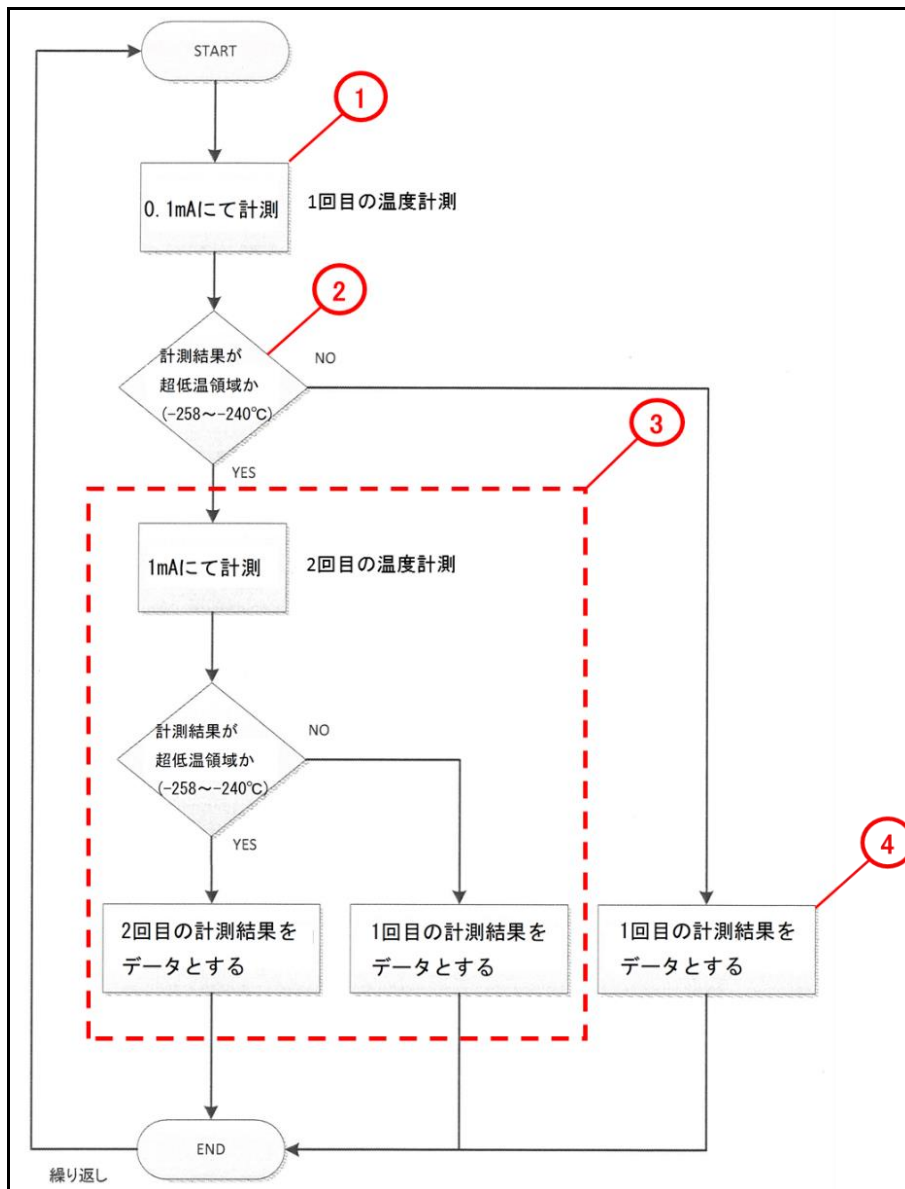


図 4.9. 測定電流の切換えフロー図

表 1 3. マイクロプロセッサによる液体水素温度計測のための測定電流の切換え動作例

700- No.	動作及び判別方法
①	システムの電源投入時及び計測開始時には、0.1mA の測定電流を温度センサに通電する。(これを 1 回目の温度計測とする)
②	マイクロプロセッサに温度センサの抵抗値相当の電圧値がフィードバックされる。フィードバックされた電圧値により、温度センサの示す温度が-253℃付近の超低温領域か判別をする。(超低温領域と他の温度領域の設定は、3.5.6 項 1)に記載) $V=0.1(\text{mA}) \times 21.6(\Omega) = 2.16(\text{mV}) \cdots 0.1\text{mA、}-253\text{℃相当の電圧値}$ $V=0.1(\text{mA}) \times 50(\Omega) = 5(\text{mV}) \cdots 0.1\text{mA、}-240\text{℃相当の電圧値}$ $2.16(\text{mV}) < 5(\text{mV}) \cdots \text{超低温領域}$
③	②の判別により、超低温相当の電圧値が検出された場合は測定電流値を 0.1mA から 1mA に切換え、1mA の測定電流を温度センサ素子に通電(これを 2 回目の温度計測とする)し、再び温度センサの示す温度が-253℃付近の超低温領域かを判別する。 $V=1(\text{mA}) \times 21.6(\Omega) = 21.6(\text{mV}) \cdots 1\text{mA、}-253\text{℃相当の電圧値}$ $V=1(\text{mA}) \times 50(\Omega) = 50(\text{mV}) \cdots 1\text{mA、}-240\text{℃相当の電圧値}$ $21.6(\text{mV}) < 50(\text{mV}) \cdots \text{超低温領域}$ 超低温領域相当の電圧値が検出された場合は、2 回目の計測値を温度表示用のデータとする。他の温度領域と判断される場合には、1 回目の計測値を温度表示用のデータとする。
④	③に該当しない他の温度領域と判断される場合には測定電流値 0.1mA を維持し、1 回目の計測値を温度表示用のデータとする。

※ 温度センサの示す温度(抵抗値)を-253℃(21.6Ω)、測定電流の切換え温度(抵抗値)を-240℃(50Ω)とする。

3.5.4 自動切換え仕様の通電回路設計

温度監視システムとしての冗長性向上を目的として、本開発の船用液体水素用温度監視システムに組み込まれるマイクロプロセッサでは、常用と予備の温度センサを自動で切換える通電回路とした。加えて、通電による温度センサの劣化を防ぐ目的で、常用温度センサ回路に通電中は予備用温度センサに通電しない回路設計とした。

図 5 0 に設計した自動切換え仕様の通電回路ブロック図を示し、マイクロプロセッサにおける詳細な通電回路の自動切換えの動作内容を表 1 4 に記載する。

日本国内で就航中の内航 LNG 船(川崎重工業株式会社建造)では、貨物温度計測をするインタンク用温度センサは常用と予備用の 2 種類(同一仕様)が装備されているが、温度センサの断線時には船員が手作業にて常用と予備の配線切換えを行なっている。配線の切換え作業を行っている間は貨物の温度監視が不能となり継続性が損なわれてしまうため、自動切換え仕様の通電回路は継続した温度監視に必要な不可欠である。

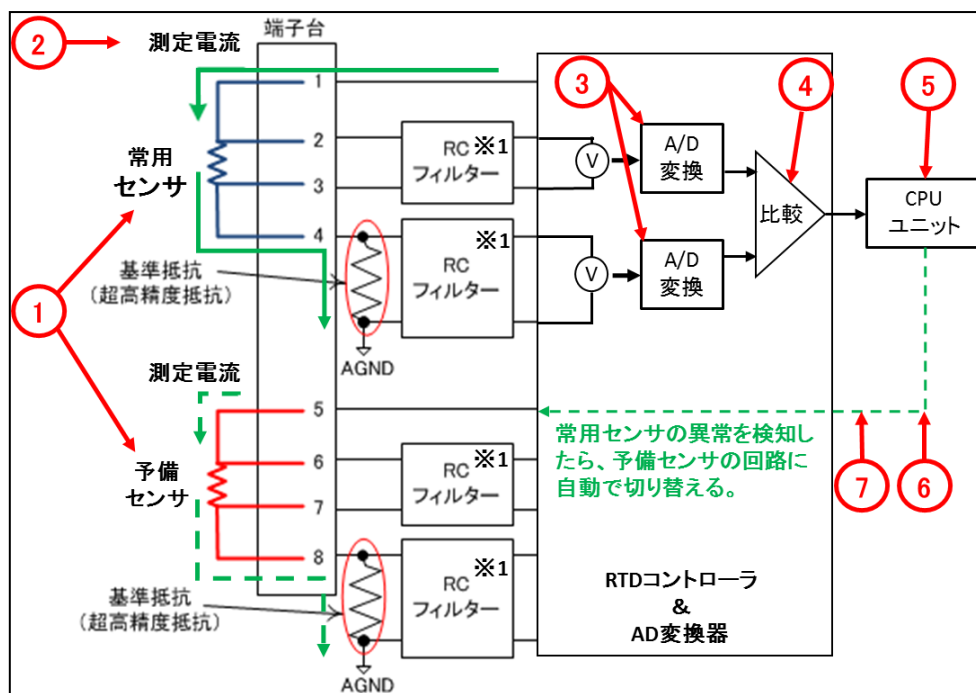


図 5 0. 自動切換え仕様の通電回路ブロック図

※ 1. RC (Resistance Capacitance) フィルタとは、抵抗とコンデンサによって構成されたノイズ除去回路。

表 1 4. マイクロプロセッサにおける通電回路の自動切換の動作内容

No.	動作内容
①	RTD (Resistance Temperature Detector) コントローラは温度センサへの通電電流制御を行う装置であり、常用温度センサと温度計測の基準となるマイクロプロセッサ内部の抵抗 (以降、本書内では基準抵抗と称す) に同じ測定電流 (0.1mA 又は 1mA) を通電する。
②	常用温度センサと基準抵抗からフィードバックされた電圧は、AD 変換器により、電圧値 (アナログ信号) からデジタル信号 (以降、ADC 値) に変換される。
③	常用温度センサと基準抵抗の ADC 値の比を温度表示用のデータとする。
④	③にて得られた温度表示用データは、CPU ユニットにて温度値に変換される。
⑤	CPU ユニットによって常用温度センサの抵抗値を常時監視し、断線、短絡による異常値を判別した場合は、自動的に予備温度センサの回路に切替える。
⑥	通電による温度センサの劣化を防ぐ目的で、常用温度センサ回路に通電中は予備用の温度センサに通電しない回路設計とする。

※ 常用温度センサの ADC 値のみで温度表示用のデータを算出した場合、測定電流が外乱 (ノイズ) により変動すると温度表示用のデータも変動し、ノイズに弱い温度計測回路となる。しかし、常用温度センサと基準抵抗の比から算出する場合、測定電流が変動しても常用温度センサと基準抵抗の ADC 値が共に変動し、その比から算出した温度表示用のデータは外乱の影響を受けず、ノイズに強い温度計測回路となる。

3.5.5 長寿命化を目的とした温度センサ素子への通電回路設計のまとめ

3.5.3 項にて報告した突入電流を抑制する回路と、3.5.4 項にて述べた自動切換え仕様の回路を設計した。温度センサの長寿命化を目的とした通電回路設計の内容を表 1 5 に取り纏め記載する。

3.5.1 項から本項までに報告した通り、平成 2 7 年度の目標(2.2 項②参照)に掲げた、電流制御及び通電回路の自動切換えにより船用液体水素用温度センサの長寿命化を実現する、温度センサ素子への通電回路設計を実施完了した。

表 1 5. 温度センサの長寿命化を目的とした通電回路設計の内容及び仕様

内容	仕様
突入電流の抑制	温度監視システムの電源投入時及び計測開始時の測定電流 0.1mA 適用によって突入電流を抑制する。図 5 0 の自動切換え仕様の通電回路ブロック図に示す RTD コントローラにより、測定電流の切換えフロー(図 4 9 参照)を具体化する。
通電回路の自動切換え	通電による温度センサの劣化を防ぐ目的で、常用温度センサ回路への通電中は予備用温度センサに通電しない回路とし、常用温度センサに異常が認識された時は、自動的に予備の温度センサ回路に切換わる。この通電回路の自動切換え機能は、温度監視システムとしての冗長性向上にも繋がる。

3.5.6 温度監視システムが保証可能な温度計測精度

3.1.1 項 6) に報告した温度計測精度の検討結果より、温度監視システムとしての温度計測範囲及び精度を検討する必要性が高まった。液体水素運搬船向けの機器として商品化を目指す本開発機器は、計測した温度の見える化までが対象となり、数値にて確認できる温度値に至るまで温度計測精度を保障しなければならないと判断した。従って、船用液体水素用温度監視システムとしての温度計測における性能を検討したので次に報告する。

1) 温度計測範囲の検討

商品化を見据え決定した、温度監視システムにおける温度計測範囲を図 5 1 に記載する。液体水素運搬船向けの温度監視システムにおいて水素の沸点以下の温度計測は不要と判断(3.1.1 項表 3 参照)できるが、システム商品としての裕度をもった温度計測範囲とし、 -263°C ~ 100°C を温度計測範囲とした。また、貨物である液体水素の温度監視が重要であると判断するため、 -258°C から -240°C の温度範囲を測定電流 1mA の高精度計測範囲に設定し、その他の温度計測範囲を測定電流 0.1mA の汎用精度計測範囲と設定した。

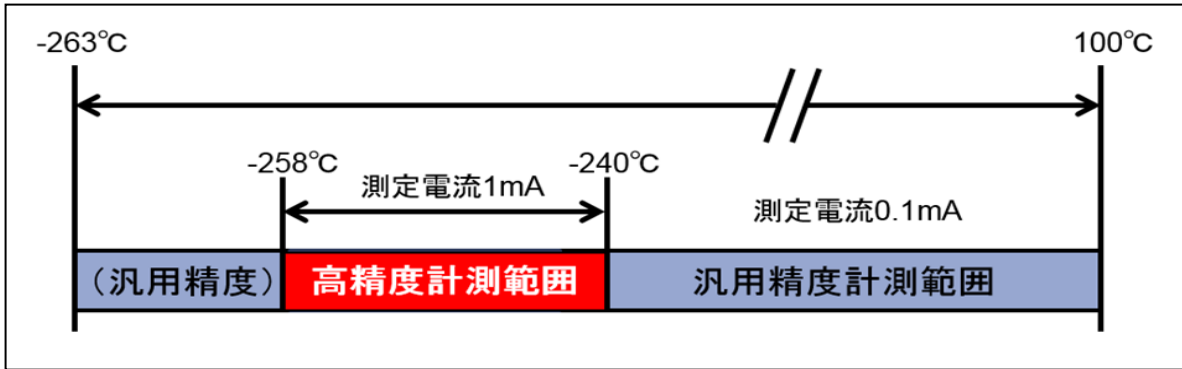


図 5.1. 温度監視システムにおける温度計測範囲

2) 温度計測精度の検討

温度監視システムの温度計測精度を検討する上で、温度計測精度に影響を及ぼす要因を下記に示し、それぞれの要因について検討した。

- ① マイクロプロセッサに適用する基準抵抗の誤差
- ② 温度表示値の最小桁に含まれるデータの丸め誤差

① マイクロプロセッサに適用する基準抵抗による誤差の検討

3.5.4 項表 1 4 内の②～④にて報告した通り、本開発の温度監視システムでは温度センサ抵抗の ADC 値と基準抵抗の ADC 値の比から温度値を算出するため、基準抵抗の精度が低いと温度センサと基準抵抗の ADC 値の比に誤差が生じ、温度監視システムの温度計測精度の低下につながる。そのため基準抵抗の選定を行なった。基準抵抗の選定には下記の計算式を用いて誤差を加味した最大、最小の ADC 値を算出し、ADC 値を再び RTD 値 (RTD 再計算値) に変換した。評価は比較法とし RTD 値と RTD 再計算値との差を温度換算し、その最大値にて行なった。

$$\text{ADC 値} = (\text{RTD} / \text{Rref} \times \text{PGA} \times (2^{\text{ADbt}} - 1)) \pm \text{ADer}$$

RTD : 温度センサの抵抗値

Rref : 基準抵抗 … 3000 Ω

PGA : アンプゲイン … 64 ± 0.02%

ADbt : AD 変換器のビット数 … 23

ADer : AD 変換誤差 … ±130

ADC 最大、最小値の算出例 (表 1 6 に示す温度 -258°C の場合)

ADC 最大値

$$(18.1725 / 2997 \times 64.0128 \times (2^{23} - 1)) + 130 = \underline{\underline{3256131}}$$

ADC 最小値

$$(18.1725 / 3003 \times 63.9872 \times (2^{23} - 1)) - 130 = \underline{\underline{3248066}}$$

表 1 6 から表 1 8 に各精度の基準抵抗をマイクロプロセッサの計測回路に適用した場合の誤差を示す。水素の沸点-253℃の温度計測を実施する場合、精度 ±0.01%の基準抵抗にて計算される最大誤差は±0.0063℃となる。表示温度の計測精度±0.05℃を実現するため、温度監視システムの精度を可能な限り高める目的で精度±0.01%の抵抗を選定した。なお、温度監視システムは、液体水素運搬船向けの計測機器として商品化を視野に入れており入手性とコスト面から、精度が±0.01%よりも高い基準抵抗は、選定の対象から除外した。

表 1 6 . 精度±0.1%基準抵抗の ADC 最大及び最小値

温度 (℃)	RTD 抵抗値 (Ω)	ADC 値 (上段:最大値) (下段:最小値)	RTD 再計算値 (Ω)	誤差 (Ω)	誤差 (℃)
-258	18.1725	3256131	18.1951	0.0226	0.0471
		3248066	18.1500	-0.0225	-0.0470
-253	21.4238	3838673	21.4503	0.0265	0.0234
		3829211	21.3974	-0.0264	-0.0233
-243	35.4671	6354838	35.5104	0.0433	0.0421
		6339345	35.4239	-0.0432	-0.0421
-240	38.55104	6907393	38.5981	0.0470	0.0459
		6890576	38.5041	-0.0469	-0.0458

表 1 7 . 精度±0.05%基準抵抗の ADC 最大及び最小値

温度 (℃)	RTD 抵抗値 (Ω)	ADC 値 (上段:最大値) (下段:最小値)	RTD 再計算値 (Ω)	誤差 (Ω)	誤差 (℃)
-258	18.1725	3254502	18.1859	0.0134	0.0281
		3249689	18.1591	-0.0134	-0.0281
-253	21.4238	3836752	21.4395	0.0157	0.0139
		3831125	21.4081	-0.0157	-0.0139
-243	35.4671	6351659	35.4927	0.0256	0.0249
		6342513	35.4416	-0.0255	-0.0248
-240	38.55104	6903938	38.5788	0.0277	0.0271
		6894019	38.5233	-0.0277	-0.0271

表 1 8 . 精度±0.01%基準抵抗使用時の ADC 最大及び最小値

温度 (°C)	RTD 抵抗値 (Ω)	ADC 値 (上段:最大値) (下段:最小値)	RTD 再計算値 (Ω)	誤差 (Ω)	誤差 (°C)
-258	18.1725	3253200	18.1787	0.0062	0.0129
		3250989	18.1663	-0.0062	-0.0129
-253	21.4238	3835218	21.4310	0.0072	0.0063
		3832657	21.4166	-0.0072	-0.0063
-243	35.4671	6349118	35.4785	0.0114	0.0111
		6345050	35.4557	-0.0114	-0.0111
-240	38.55104	6901176	38.5633	0.0123	0.0120
		6896777	38.5387	-0.0123	-0.0120

② 温度表示値の最小桁に含まれるデータの丸め誤差の検討

3.1.1 項 6) に報告した温度計測精度の検討結果より、温度表示の最小桁は 0.01°C とする。0.01°C 以下の温度変化は四捨五入により表示されるため、温度表示において最大 0.005°C のデータの丸め誤差が含まれる。

3) 温度監視システムとしての温度計測精度のまとめ

精度±0.01%の基準抵抗をマイクロプロセッサに適用することにより、-253°C時に生じる温度誤差は、高精度計測範囲で計算上「±0.0063°C」となる。また、温度表示値の最小桁に含まれるデータの丸め誤差 0.005°Cを加味すると、温度監視システムが有する温度計測精度は、最大で「±0.0113°C」となる。これに温度監視システムが設置される外部環境温度などの影響を加味し、高精度計測範囲における温度監視システムの温度計測精度を±0.02°C(-0.02°C, +0.02°C含む)と想定した。

4. 平成 27 年度の目標の達成状況

平成 27 年度の目標達成状況は計画に対して 100%となった。詳細を次の①から④に報告する。

① 船用液体水素用温度センサのプロトタイプ設計

- ・-253°Cの超低温領域の温度を高精度で計測するため、感温部及び導体部の小型化により熱容量を抑えた形状の温度センサを設計した。
- ・水素及び低温脆性、並びに塩害を考慮し温度センサの外被材質を SUS316L とした。
- ・LNG 船用温度センサに用いられている従来の技術と比較して、10.62 倍の感度向上と 200%以上の応答性向上を実現する温度センサ仕様とした。

- ② 船用液体水素用温度センサのプロトタイプ試作
- ・感温部外径 $\Phi 1.6\text{mm}$ 、 $\Phi 2.0\text{mm}$ 、 $\Phi 3.2\text{mm}$ のプロトタイプセンサを各種2本、計6本試作した。
- ③ -253°C の超低温領域における性能評価
- ・液体水素を用いた -253°C の超低温領域における性能評価試験を実施し、基準温度との最大温度差は -0.047°C であり、試作のプロトタイプ温度センサの温度計測精度は設計段階で期待した $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ を満足した。
 - ・温度計測精度の根幹である個体のばらつきについて評価したところ、Pt1000 Ω 白金測温抵抗体仕様そのものが、 0.010°C 未満の精度を確保可能なことを確認した。
- ④ 温度センサ素子への通電回路の設計
- ・温度センサの長寿命化を目的とした通電回路設計では、センサ素子への突入電流を抑制し、且つ、通電回路の自動切換えを可能にする回路設計を実施完了した。

第Ⅱ部 平成28年度

5. 平成28年度の実施内容

船用液体水素用温度センサ及び温度監視システムの技術開発における平成28年度の実施内容を報告する。

5.1 実用化に供する船用液体水素用温度センサの設計

5.1.1 温度センサの用途及び仕様検討

船舶には様々な温度計測箇所が存在するが、用途により温度センサに求められる性能が異なる。本事業ではLNG船で得た豊富な実績をベースに、液体水素運搬船用として下記①から⑤に列挙する5種類の実用化に供する温度センサを選定し、それぞれの用途及び仕様検討を実施した。

- ① インタンク用高精度温度センサ (No. 1)
- ② 応答性を追求したタンク内高精度液面ポジションセンサ (No. 2)
- ③ タンク内各部のモニター用温度センサ (No. 3)
- ④ 船内多用途に対応する温度センサ (No. 4)
- ⑤ ブロックタイプの表面温度計測用センサ (No. 5)

1) インタンク用高精度温度センサ (No. 1)

液体水素運搬船が貨物とする液体水素は、非常に蒸発しやすいことに加えて飽和蒸気圧が温度変化に対して大きな影響を受ける。液体水素運搬船が安全に航行するためには、タンク内の液体水素の温度を高精度で計測して貨物の状態を把握する必要がある。従って、インタンク用高精度温度センサは $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ ($-253^{\circ}\text{C}\sim-243^{\circ}\text{C}$)の高精度な温度計測を実現するとともに、安定した品質を確保可能なセンサ形状及び感温部構造とした。

2) 応答性を追求したタンク内高精度液面ポジションセンサ (No. 2)

液化ガス運搬船等を運用する際、輸送効率が求められるためタンク内には可能な限りの液化ガスを積載する。通常、液面計を装備してタンク内の液化ガスの積載状態を把握するが、世界初となる液体水素運搬船において水素用液面計の実績はない。そのため応答性を高めた温度センサをタンク上部に装備し、気液境界面を正確に検知する温度センサ利用を検討した。この用途に対する温度センサには、液面を正確に検知する追及された応答性と高精度な温度計測が求められるため、応答性及び高精度双方の性能を満足する温度センサ仕様とし、適用する温度計測精度を $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ ($-253^{\circ}\text{C}\sim-243^{\circ}\text{C}$)とした。

但し、本モデルの温度センサは小型形状とするため製作上の難易度が上がり高価となる。なお、設計前段階でタンク内高精度液面ポジションセンサに必要とされる応答性をモックアップで評価した結果を図5-2に示すが、温度センサを小型化することで本用途に適した計測ができるものと判断した。

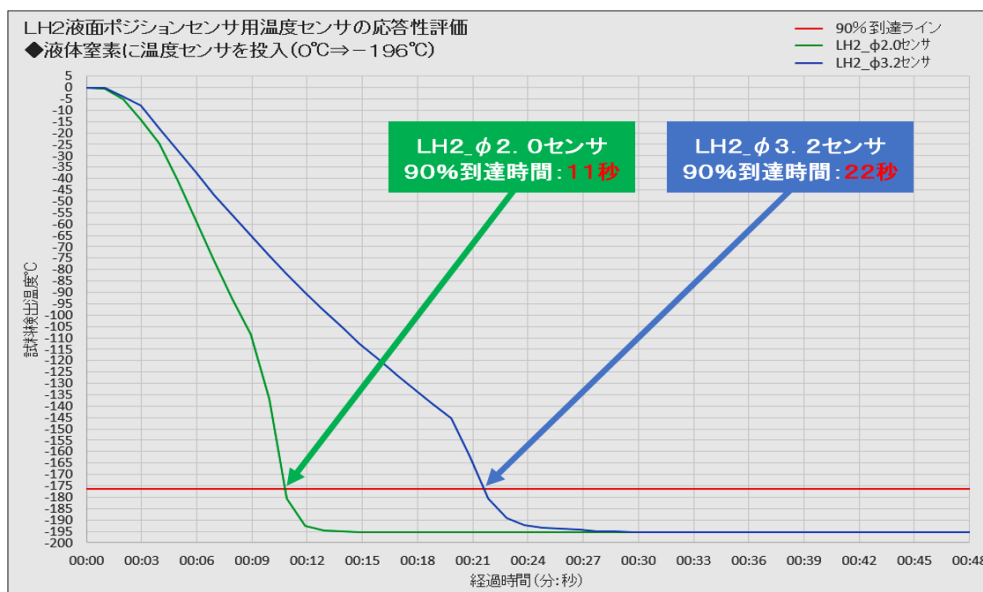


図 5 2. タンク内高精度液面ポジションセンサの応答性における設計前の評価
 ※LH2_φ2.0 センサがタンク内高精度液面ポジションセンサに相当

3) タンク内各部のモニター用温度センサ (No. 3)

液体水素運搬船が航行する際に、波浪などの外部からの影響を受けて本船及びタンク内の液体水素が揺動することで攪拌され、液体水素中に温度分布や対流が生じる可能性が高い。液体水素の温度分布を把握するにはタンク内各部の温度をモニターする必要がある。この用途に対する温度センサには、タンク内各部に装備されることを加味して艤装時の取扱い性と強度が必要と判断し、インタンク用及び液面ポジションセンサよりも強度の高い温度センサ仕様とした。なお、モニター用として設計する温度センサではあるが、温度計測精度はLNG船で適用される精度 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ ($-253^{\circ}\text{C}\sim-243^{\circ}\text{C}$)を設定した。

4) 船内多用途に対応する温度センサ (No. 4)

液体水素運搬船が世界初であるため、温度計測の箇所及び用途の実績例がない。通常、計測機器は計測する外部環境・用途・精度等の求められる性能に適した設計が成され、様々な用途に対応する形状及び仕様となる。この様々な用途に対応するため、温度センサの製造技術として溶接加工が挙げられるが、船用温度センサは航行時の波浪によって生じる動揺や推進機関及び発電機関に起因する振動による衝撃力を受けるため、外力に打勝つ強度が溶接部にも必要となる。液体水素を温度計測の対象とした場合に、限りなく抑制した熱容量が求められ必然的に温度センサ形状は小型となるが、小型形状では溶接部に強度を求めることは困難となり、これに対応するためセンサ形状を大きくすると温度計測の正確性を損なう恐れがある。この強度と計測精度の相反する課題に対して、強度を持たせた溶接と高い計測精度 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ ($-253^{\circ}\text{C}\sim-243^{\circ}\text{C}$)を両立する特殊な形状の温度センサ仕様を検討し、船内多用途に対応する温度センサを開発することとした。

但し、本モデルの特殊形状の温度センサは計測精度を確保するための温度校正の難易度が上がり、結果として個体のばらつきが大きくなる。

5) 表面温度計測用センサ (No. 5)

LNG船などの液化ガス運搬船では、ガスリークに対応してタンクの外側隔壁周辺の隔離された空間の温度を計測する。爆発限界が広く拡散しやすい特性を持つ液体水素では、ガスリークを瞬時に検知することが望ましいと判断した。そのため空間の温度を計測する2次的な方式から、隔壁の表面温度を直接計測する温度センサの仕様とし、計測精度についてはLNG船で適用される精度 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ ($-253^{\circ}\text{C} \sim -243^{\circ}\text{C}$)を設定した。

なお、液体水素運搬船では真空断熱層を有する二重配管を適用し、荷役時に配管内を流れる液体水素の通液管理が必要とされるが、真空断熱層をまたぎ配管内に直接温度センサを挿入する計測方法は、安全面で非常に高いリスクをとらなければならない。このような用途及び安全面においても、本項の表面温度計測用センサは利便性が高い温度センサと成り得る。

5.1.2 船用液体水素用温度センサの設計

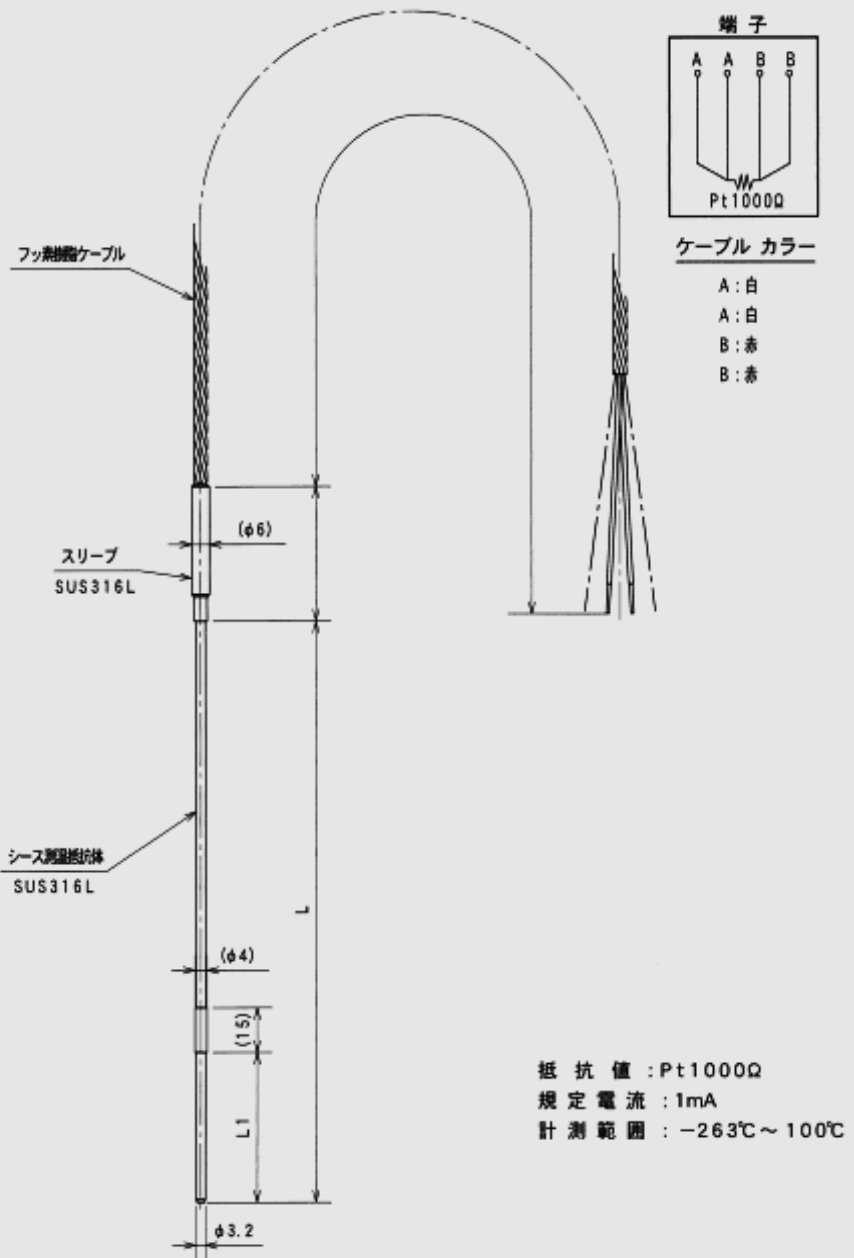
上述の5.1.1項の温度センサの用途及び仕様検討を加味した実用化に供する船用液体水素用温度センサの設計を実施した。

設計の詳細を表19に示すが、設計した各温度センサは、3.4項のプロトタイプセンサの評価値をもとに詳細寸法を決定し、内部構造仕様についても温度計測精度を向上させ且つ、品質のばらつきを抑制可能な技術的改善を施した設計となる。5種類の温度センサ外形図を図53から図57に報告する。

表19. 実用化に供する船用液体水素用温度センサの設計詳細

No	モデル	用途	計測精度	備考
1	感温部 φ3.2mm	インタンク用 高精度温度センサ	$\pm 0.05^{\circ}\text{C}$	小型化形状により熱容量を抑制
2	感温部 φ2.0mm	応答性を追求したタンク内 高精度液面ポジションセンサ	$\pm 0.05^{\circ}\text{C}$	インタンク用よりも更に小型の感温部にて応答性向上
3	感温部 φ4.8mm	タンク内各部のモニター用 温度センサ	$\pm 0.2^{\circ}\text{C}$	—
4	テーパ形状	船内多用途に対応する温度 センサ	$\pm 0.05^{\circ}\text{C}$	テーパ形状のシースを適用
5	ブロック形状	表面温度計測用センサ	$\pm 0.2^{\circ}\text{C}$	ブロック下部の温度検出面に水平に抵抗素子を装備

No. 1 : 感温部φ3.2モデル

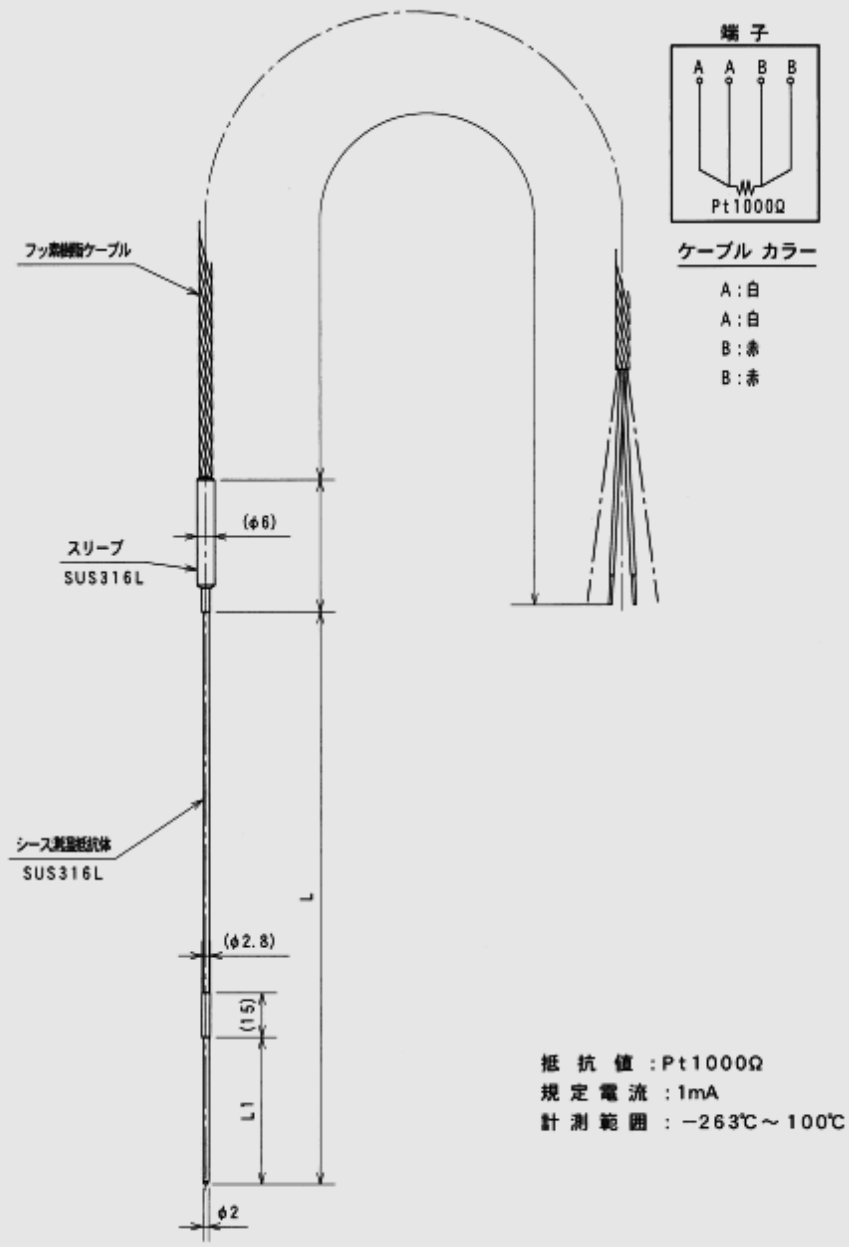


△	DATE	SCALE	3/4 ANGLE PROJECTION	TITLE
	' 16, 10, 18	N / S		型式 : R-35 測温抵抗体
△	APPROVED	DRAWN	16/00	
△	明陽電機株式会社 MEIYO ELECTRIC CO., LTD			DWG. NO. R-35-LH2-32
△	REVISION	BY		4C

図 5 3 . No. 1 インタンク用高精度温度センサ

※感温部及び導体部外径 φ 3. 2mm

No. 2 : 感温部φ2.0モデル



△	DATE	16. 10. 14	SCALE	N / S	3rd ANGLE PROJECTION	TITLE
	APPROVED		CHECKED		DRAWN	型式 : R-35 測温抵抗体
△	明陽電機株式会社 MEIYO ELECTRIC CO., LTD				DWG. NO.	R-35-LH2-20 4C
△	REVISION	BY				

図5 4. No. 2 応答性を追求したタンク内高精度液面ポジションセンサ
※感温部及び導体部外径φ2.0mm

No. 3 : 感温部φ4.8モデル

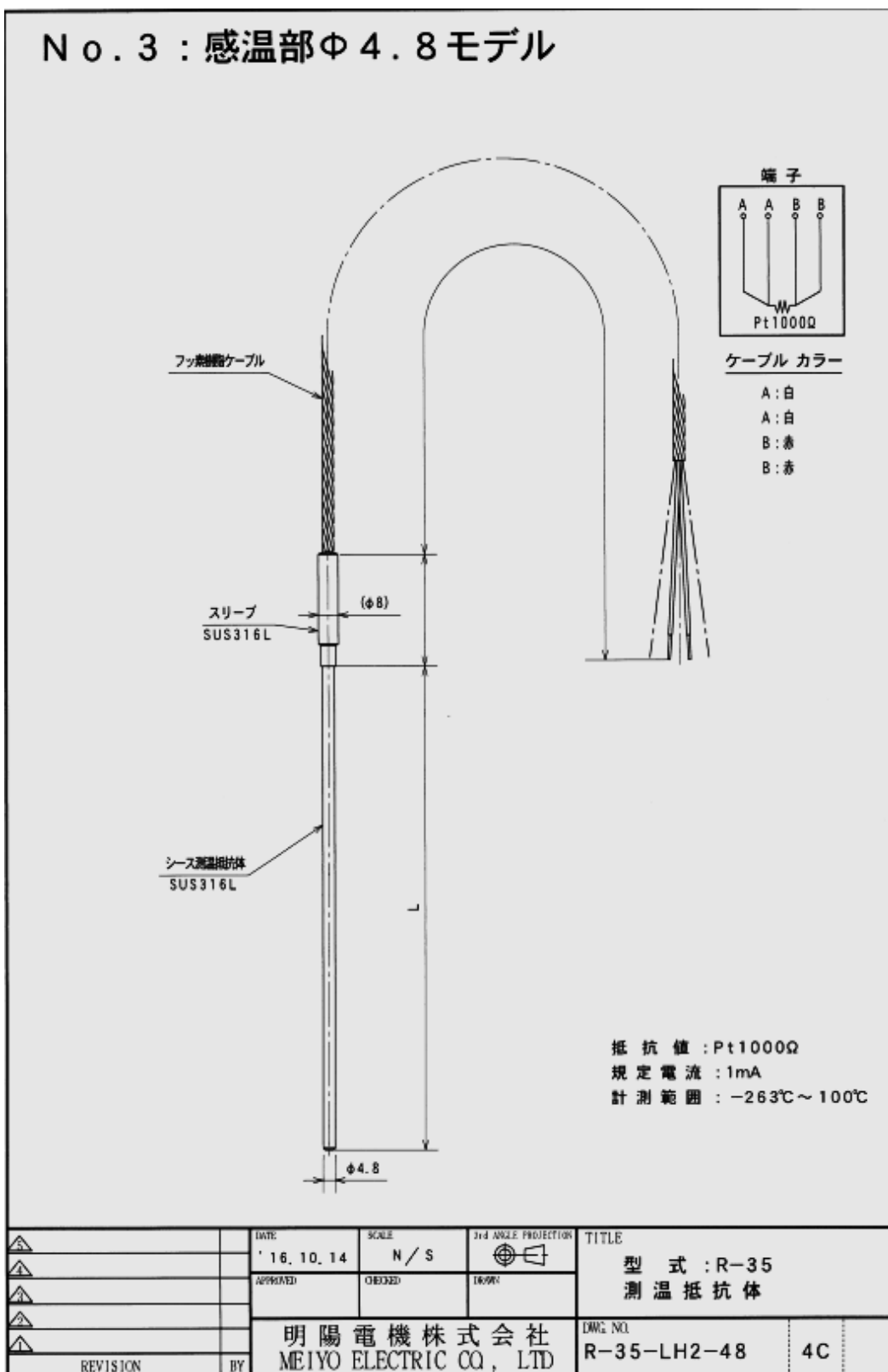
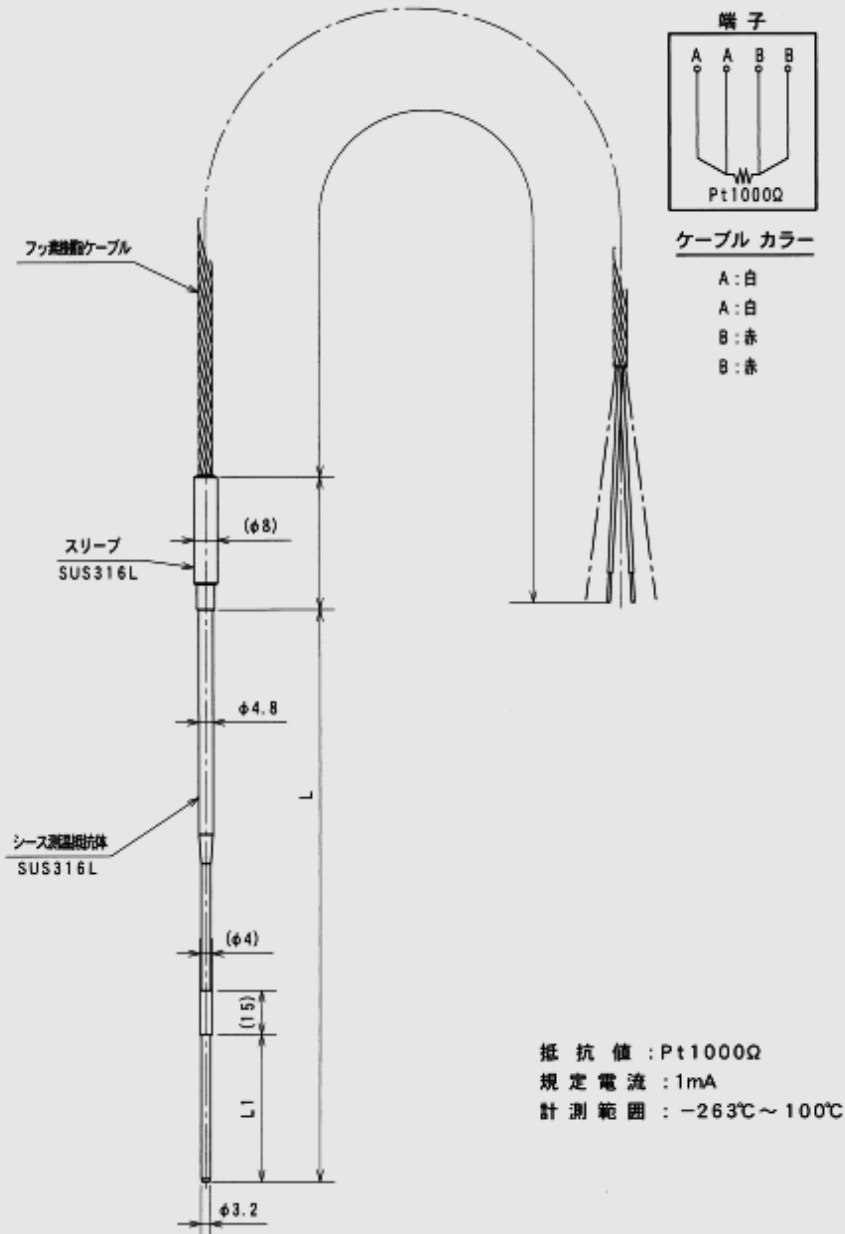


図 5 5. No. 3 タンク内各部のモニター用温度センサ

※感温部及び導体部外径 φ 4. 8mm

No. 4 : テーパー形状モデル



△	DATE	SCALE	3rd ANGLE PROJECTION	TITLE
	' 16. 10. 18	N / S		型式 : R-35 測温抵抗体
△	APPROVED	DESIGNED	DRAWN	
△				
△				
△				
REVISION	BY	明陽電機株式会社 MEIYO ELECTRIC CO., LTD		DWG NO. R-35-LH2-48-32 4C

図 5 6 . No. 4 船内多用途に対応する温度センサ
※感温部外径 φ 3. 2mm / 導体部外径 φ 4. 8mm テーパー形状

No. 5 : ブロック形状モデル

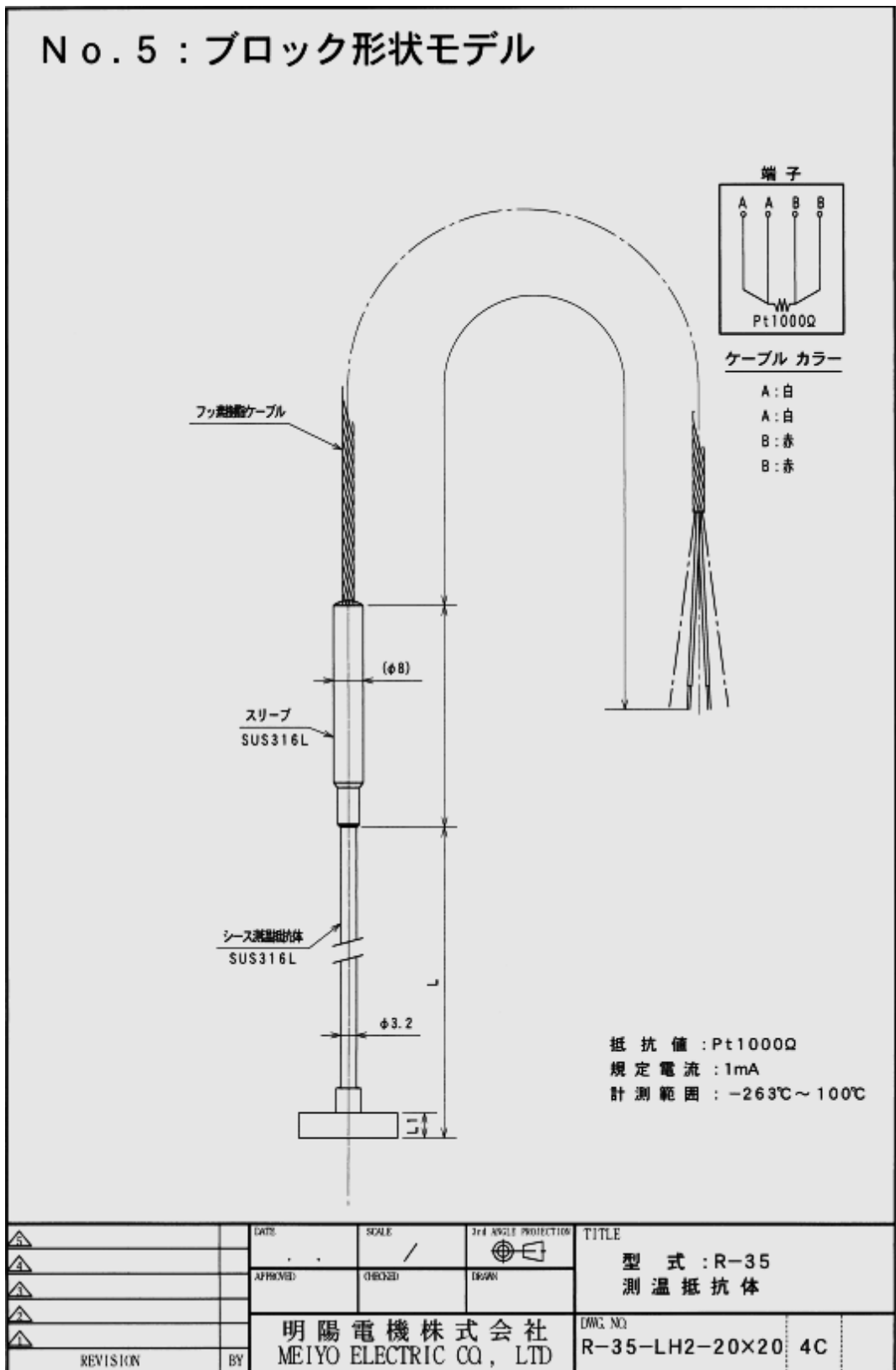


図 5 7 . No. 5 表面温度計測用センサ
※導体部外径 φ 3. 2mm/感温部はブロック形状

5.2 実用化に供する船用液体水素用温度センサの試作

5.1.2 項に報告した設計をもとに、5 種類の実用化に供する船用液体水素用温度センサを試作した。試作した各温度センサは、設計段階の意図を反映した構造や形状、材質であることを確認した。各温度センサの外観を図 5 8 から図 6 2 に示す。



図 5 8 . No. 1 インタンク用高精度温度センサ外観(導体部長 350mm)

※ケーブル端末には温度校正及び評価試験のための端子を装備

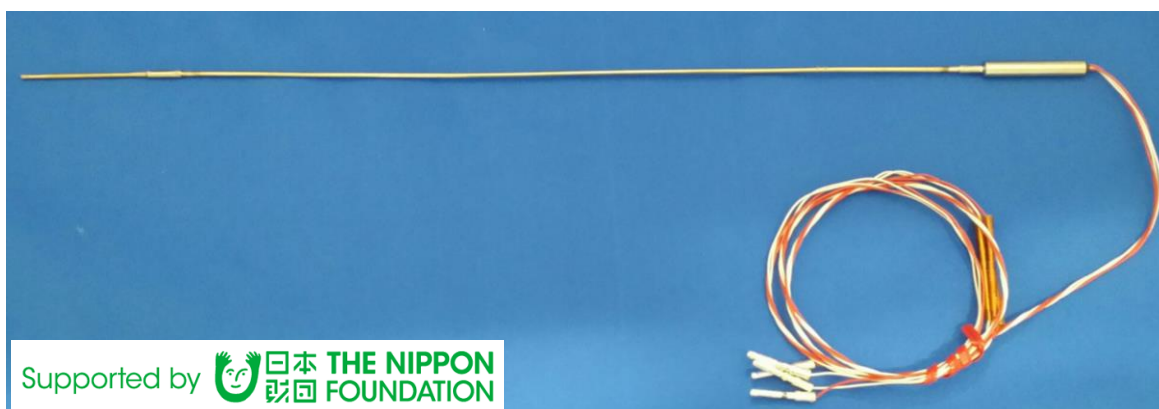


図 5 9 . No. 2 応答性を追求したタンク内高精度液面ポジションセンサ外観(導体部長 350mm)

※ケーブル端末には温度校正及び評価試験のための端子を装備

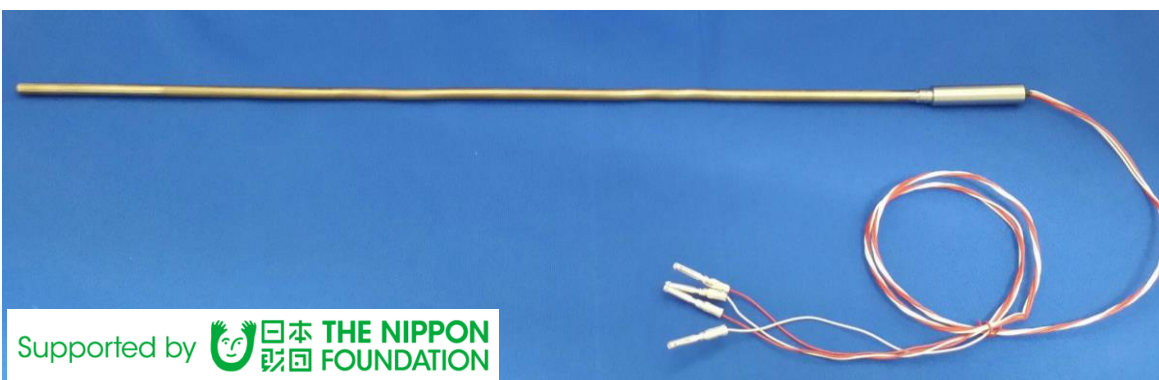


図 6 0 . No. 3 タンク内各部のモニター用温度センサ外観(導体部長 350mm)

※ケーブル端末には温度校正及び評価試験のための端子を装備

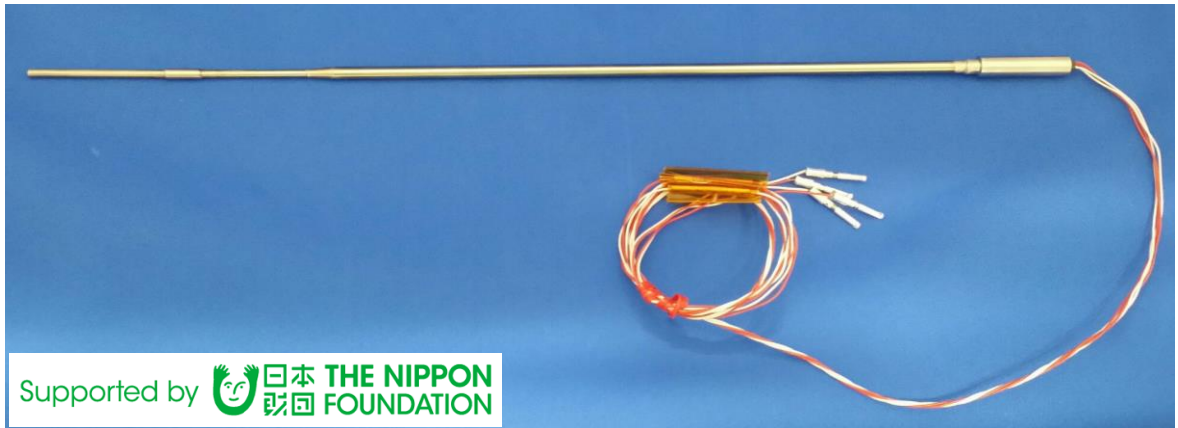


図 6 1 . No. 4 船内多用途に対応する温度センサ外観(導体部長 350mm)
 ※ケーブル端末には温度校正及び評価試験のための端子を装備

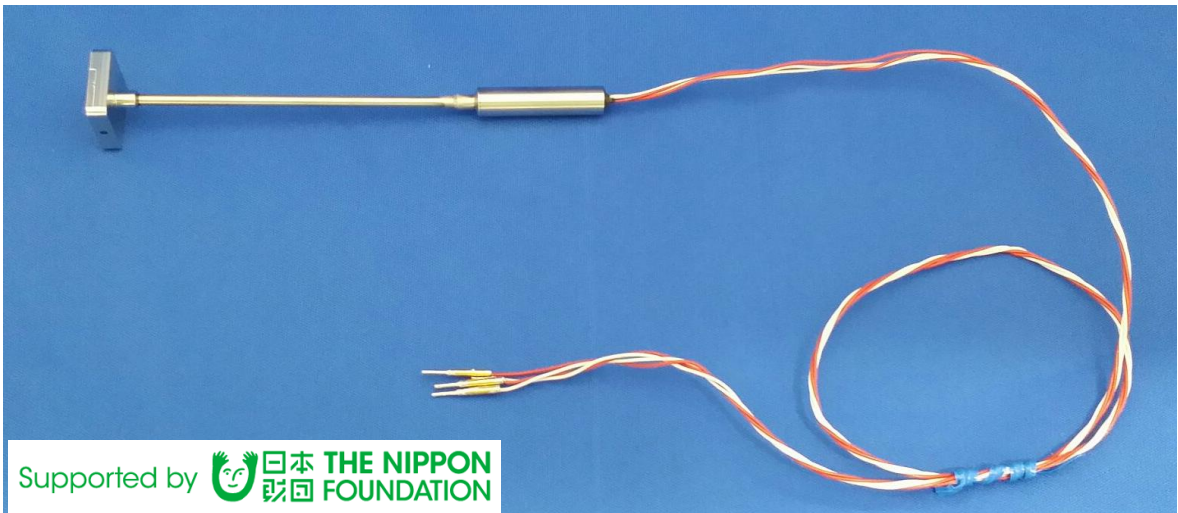


図 6 2 . No. 5 表面温度計測用センサ(導体部長 150mm)
 ※ケーブル端末には温度校正及び評価試験のための端子を装備

5.3 実用化に供する船用液体水素用温度センサの性能評価

5.2 項にて試作した 5 種類の実用化に供する船用液体水素用温度センサにおける性能評価を実施した。その内容を次に報告する。

5.3.1 液体水素を用いた -253°C の超低温領域における性能評価

実用化に供する船用液体水素用温度センサの性能評価は、3.4 項のプロトタイプセンサの評価と同様の手順及び手法にて実施した。産業技術総合研究所・省エネルギー研究部門の指導と協力を得て、実際に液体水素を用いた -253°C の超低温領域における性能評価の概要を表 20 に示す。また、クライオスタット内の温度分布や液体水素の沸騰状態に起因する対流による温度変動に配慮して、温度計測精度評価の信頼性を向上させる目的により、無酸素銅製の均熱ブロックを適用して評価方法の改善も施した。無酸素銅製の均熱ブロックを適用した性能評価時の概要を図 6 3 に示す。

なお、本項の評価時の基準温度には日本の標準温度で検証した素子形状試料(図20参照)を適用するが、厳密な温度計測精度の評価を目的として Pt-Co100Ω 測温抵抗体よりも -253℃で分解能が約 2.1 倍高い Pt1000Ω 白金測温抵抗体の温度値を基準温度に適用した。

表 20. 液体水素を用いた-253℃の超低温領域における性能評価の概要

項目	内容
試験設備	産業技術総合研究所・省エネルギー研究部門所有の試験設備 (3.4.1 項 図 18 参照)
温度計測対象	液体水素(大気圧下-253℃)
評価手法	日本の標準温度で検証した基準温度との比較法 (3.4.3 項参照)
評価試料	5 種類の実用化に供する船用液体水素用温度センサ (5.2 項参照)
飽和温度変化	実験時の気圧を計測して気圧変動によって生じる飽和温度変化が正確に追従しているかを最優先事項とする(基準温度)
水頭圧の影響	液体水素の気液境界面の推移を撮影し、水頭圧によって影響を受ける温度値を補正
改善項目	均熱ブロックを適用してクライオスタット内の温度分布及び温度変動を抑制し、温度環境を安定させて評価を実施 ※均熱ブロックは高精度(±0.05℃)温度センサに適用

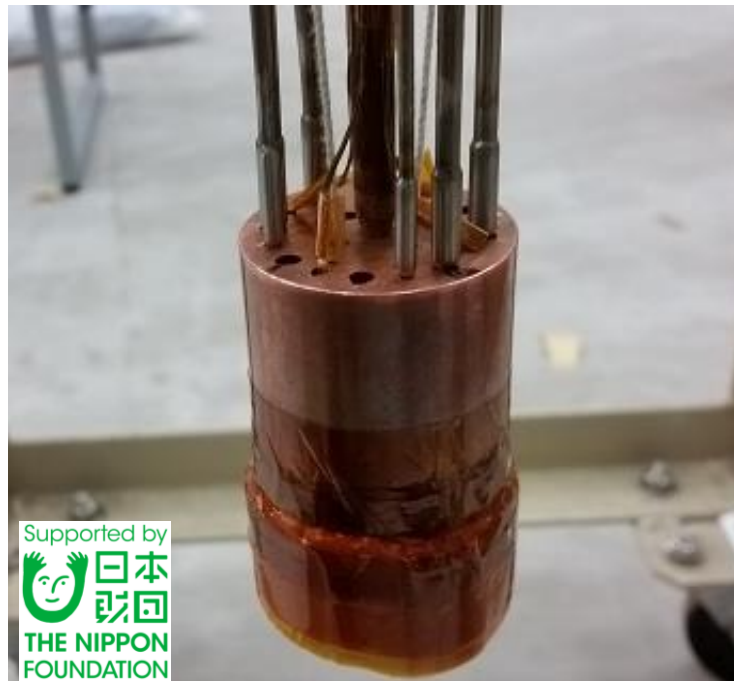


図 63. 均熱ブロックを適用した性能評価時の概要

5.3.2 インタンク用高精度温度センサの評価結果

感温部外径φ3.2mmとしたインタンク用高精度温度センサ(図5.3及び図5.8参照)の液体水素を用いた評価試験の実測データを図6.4、基準温度からの温度差にて誤差を算出した計測精度の評価結果を図6.5に示す。設計段階で決定した温度計測精度±0.05℃を満足する性能を確認した。

また、同じ形状及び仕様の温度センサを並行して評価したところ、計測精度±0.05℃を満足するとともに温度センサの個体のばらつきが0.01℃以下であることも確認した。

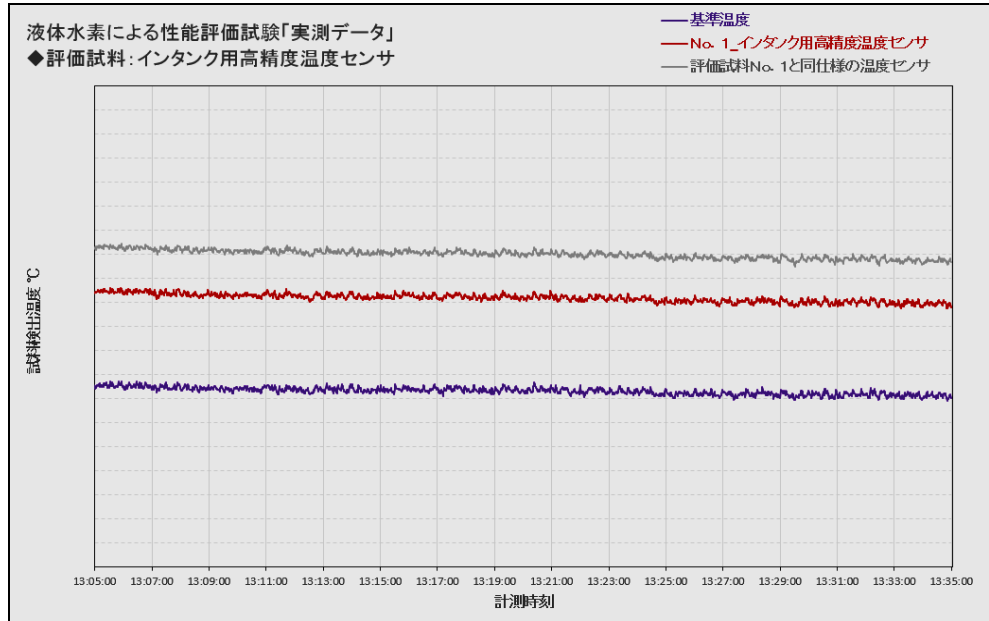


図6.4. インタンク用高精度温度センサの実測データ

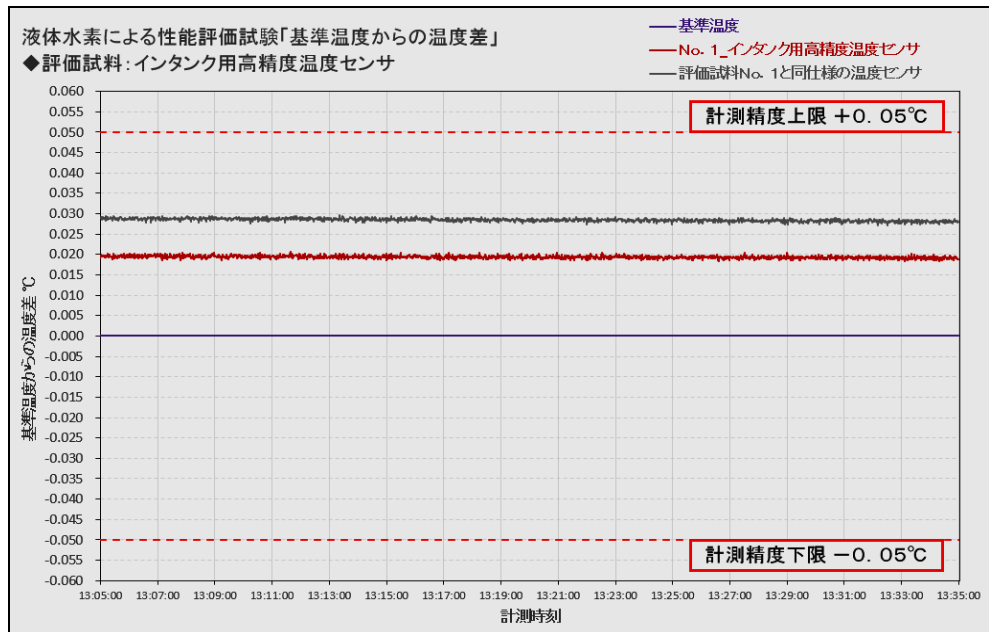


図6.5. インタンク用高精度温度センサの計測精度評価結果

5.3.3 応答性を追求したタンク内高精度液面ポジションセンサの評価結果

感温部外径φ2.0mmとした応答性を追求したタンク内高精度液面ポジションセンサ(図5.4及び図5.9参照)の実測データを図6.6、計測精度の評価結果を図6.7に示す。評価した2本の試料において、設計段階で決定した温度計測精度±0.05℃を満足し、且つ温度センサの個体のばらつきが0.01℃以下であることを確認した。また、設計前にモックアップを用いた応答性の評価結果(図5.2参照)と同様の性能を有していることも確認した。

なお、液面ポジションを計測する温度センサ利用の検討を実施して、実際に液体水素を用いた検証の結果、気液境界面の位置を正確に検知可能なことを確認した。

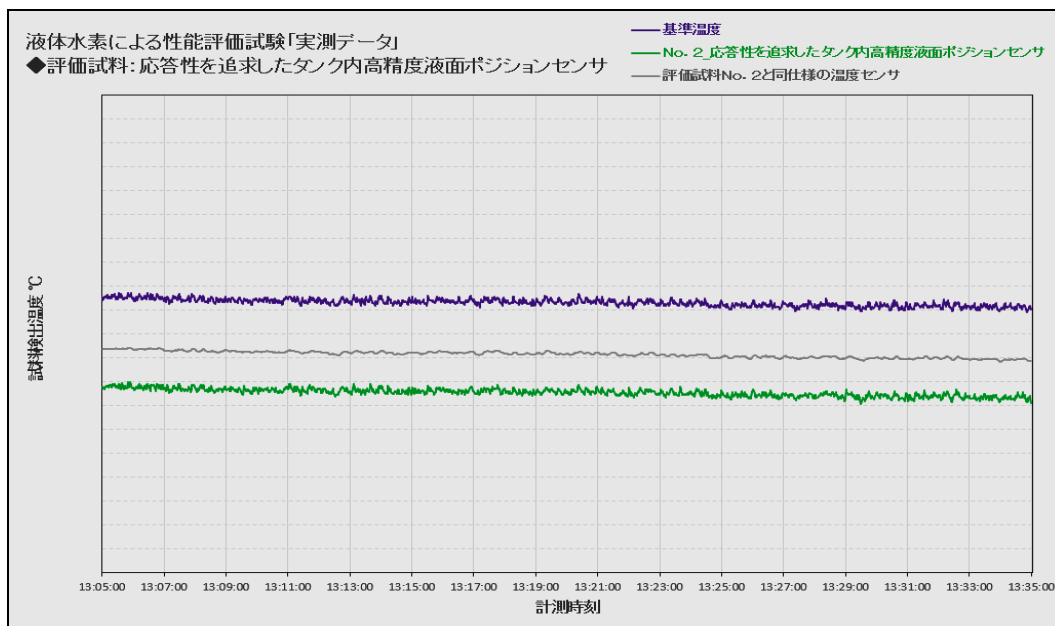


図6.6. 応答性を追求したタンク内高精度液面ポジションセンサの実測データ

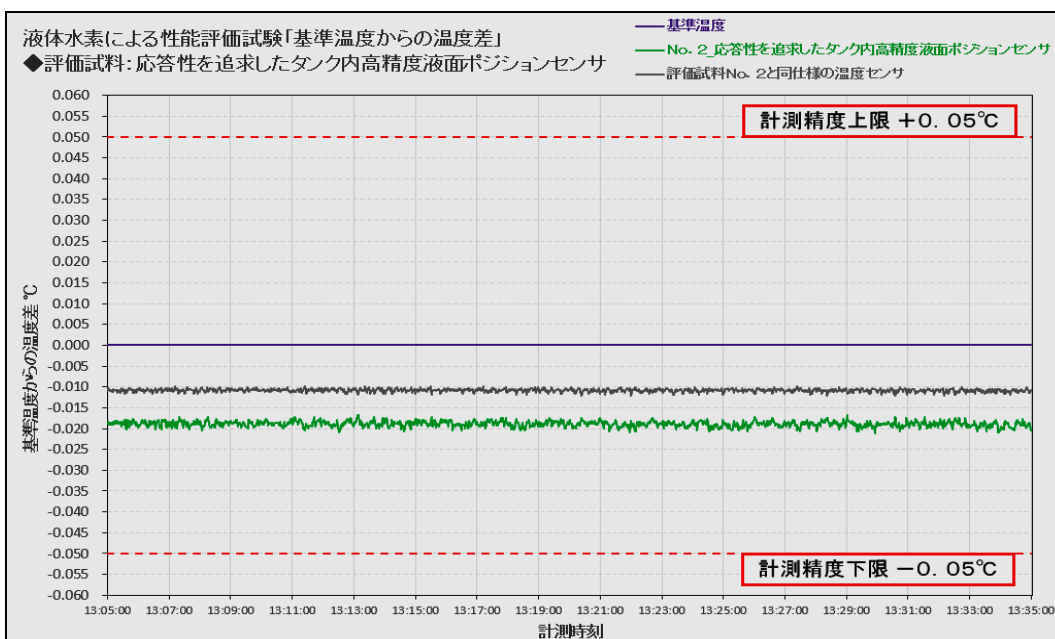


図6.7. 応答性を追求したタンク内高精度液面ポジションセンサの計測精度評価結果

5.3.4 タンク内各部のモニター用温度センサの評価結果

感温部外径φ4.8mmとしたタンク内各部のモニター用温度センサ(図55及び図60参照)の実測データを図68、計測精度の評価結果を図69に示す。設計段階で決定した温度計測精度±0.2℃を満足する結果を得て、モニター用温度センサであってもLNG船向けインタンク用温度センサと同等以上の温度計測精度であることを実証した。

また、結果考察として導体部及び感温部外径φ4.8mmの温度センサは、熱容量が大きいため気相部からの熱進入を助長して液体水素の温度を高精度(±0.05℃)で計測するには不向きとなるため、温度センサの小型化は高精度計測には必須の事項と考える。

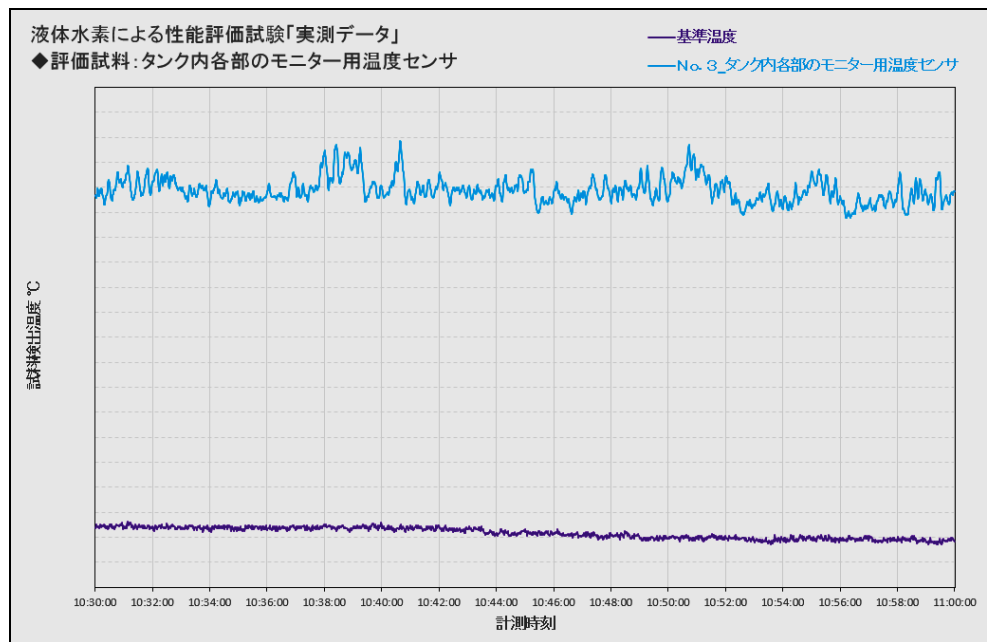


図68. タンク内各部のモニター用温度センサの実測データ

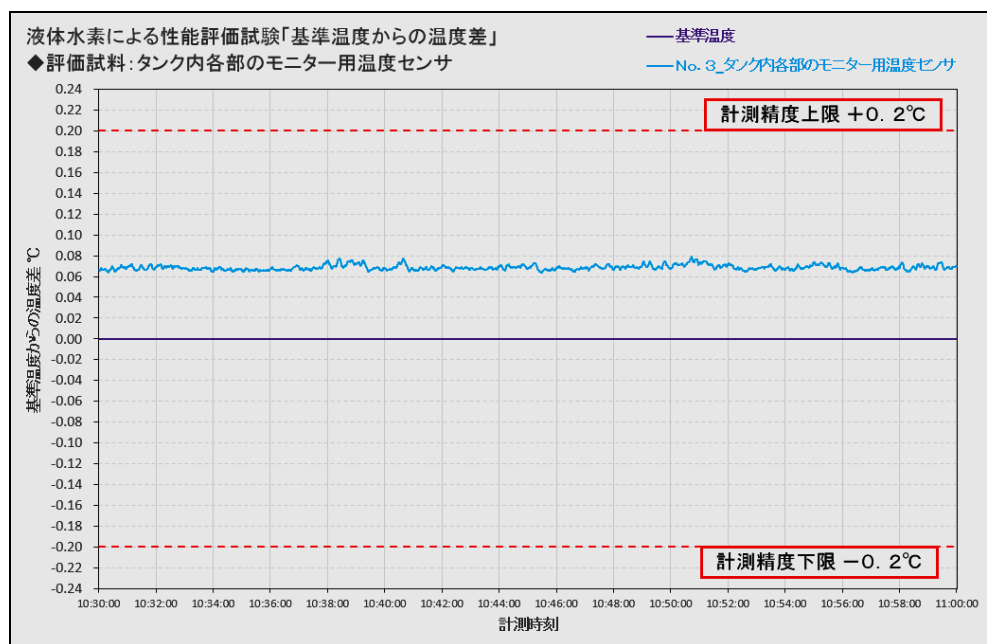


図69. タンク内各部のモニター用温度センサの計測精度評価結果

5.3.5 船内多用途に対応する温度センサの評価結果

感温部外径φ3.2mm・導体部外径φ4.8mmのテーパ形状とした船内多用途に対応する温度センサ(図5.6及び図6.1参照)の実測データを図7.0、計測精度の評価結果を図7.1に示す。評価した2本の試料において、設計段階で決定した温度計測精度±0.05℃を満足していることを確認した。

なお、評価した2本の試料において温度センサの個体のばらつきが0.04℃程度存在していることから、テーパなど複雑な形状のセンサの温度校正において改善の余地があることを認識した。

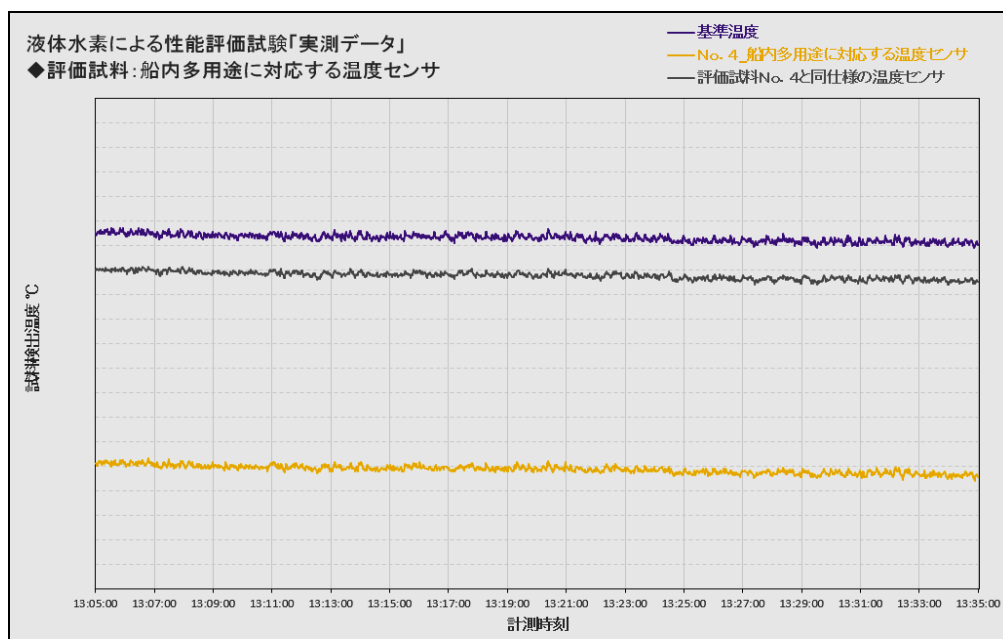


図7.0. 船内多用途に対応する温度センサの実測データ

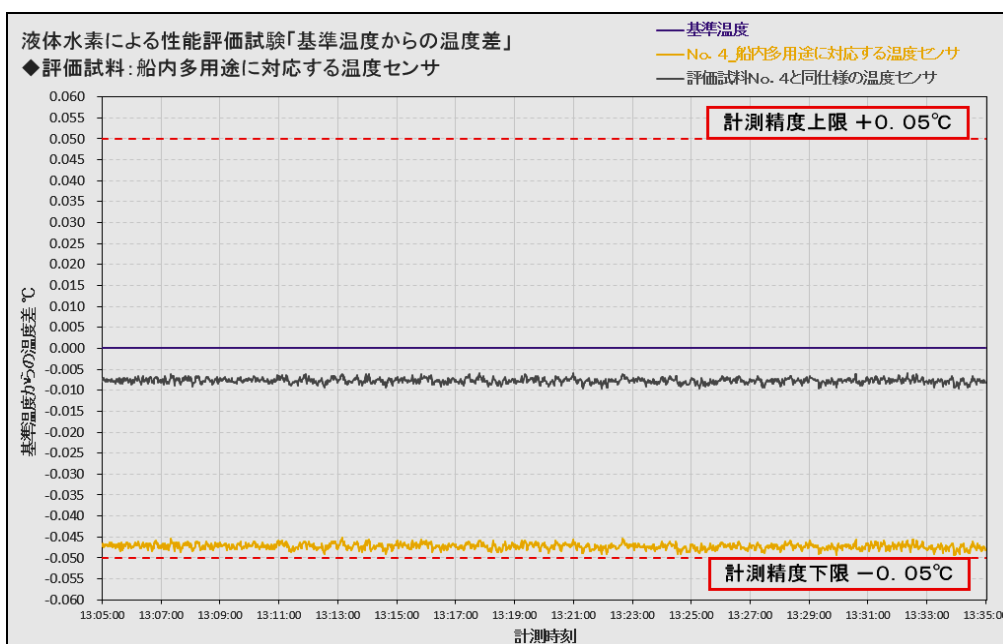


図7.1. 船内多用途に対応する温度センサの計測精度評価結果

5.3.6 表面温度計測用センサの評価結果

感温部をブロック形状とした表面温度計測用センサ(図5.7及び図6.2参照)の実測データを図7.2、計測精度の評価結果を図7.3に示す。設計段階で決定した温度計測精度 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ を満足する結果を得て、LNG船向けインタンク用温度センサと同等以上の温度計測精度であることを実証した。

また、図7.4に示すように表面温度計測用センサにブロックとビスを付属して、 -253°C の超低温領域における表面温度計測の疑似的な評価も実施した。評価結果は、センサ感温部と付属ブロックの境界から約21mmの厚さまで温度計測が可能であり、表面温度を計測するセンサとして十分な役割を果たせる仕様と判断した。

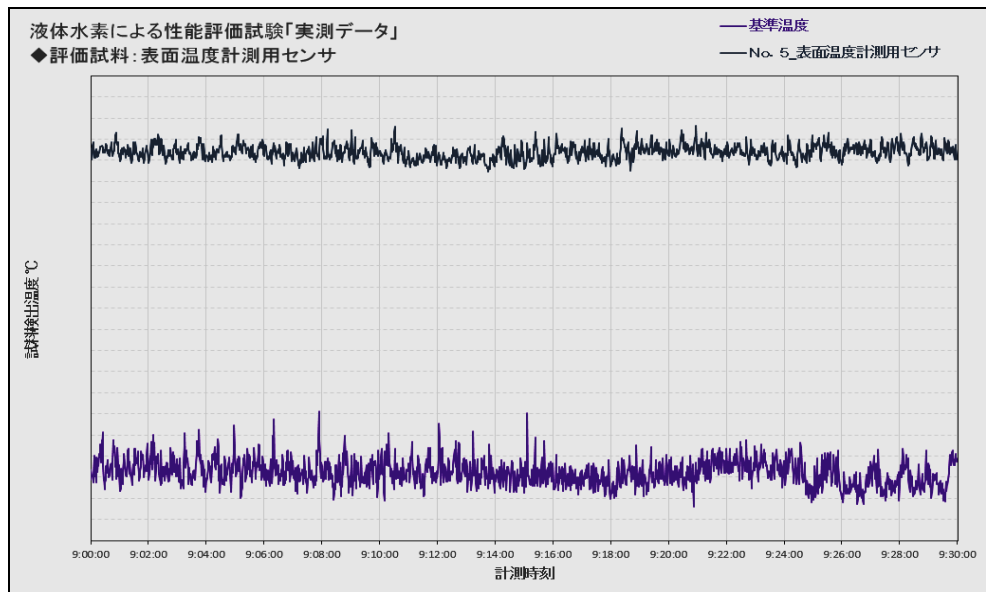


図7.2. 表面温度計測用センサの実測データ

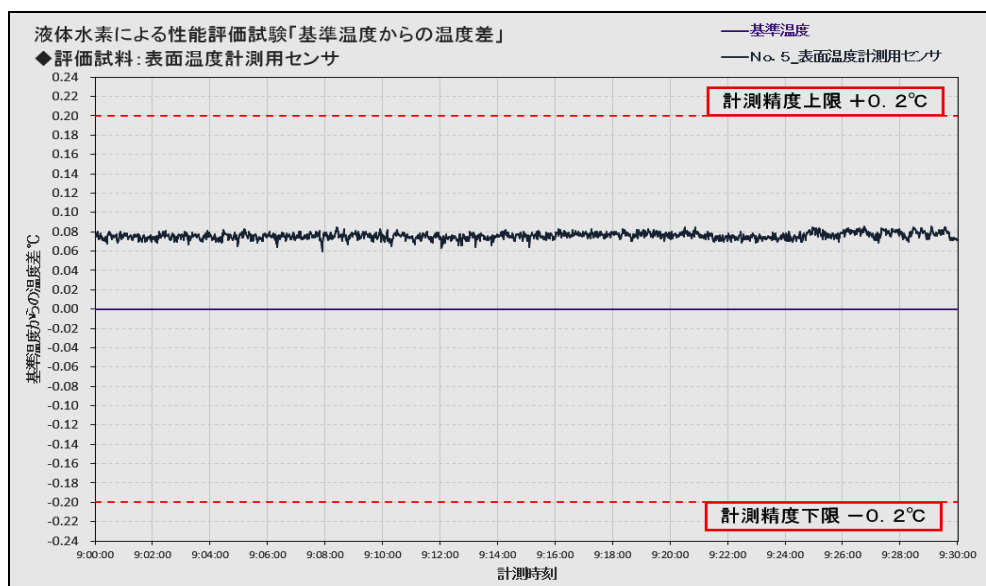


図7.3. 表面温度計測用センサの計測精度評価結果



図 7 4. 表面温度計測用センサの評価状態

5.3.7 液体水素を用いた -253°C の超低温領域における性能評価のまとめ

設計及び試作した 5 種類の実用化に供する船用液体水素用温度センサの性能評価結果を表 2 1 に報告する。全ての温度センサにおいて、用途に必要なとされる温度計測が可能であること、センサ各々に決定した計測精度を満足することを実証した。

本評価により液体水素の特性から判断した温度計測精度 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ は十分に実現可能なものとなった。

表 2 1. 実用化に供する船用液体水素用温度センサの性能評価結果

No	用途	計測精度	誤差 (基準温度との差)	同仕様センサ の評価結果	評価条件
1	インタンク用 高精度温度センサ	$\pm 0.05^{\circ}\text{C}$	最大 $+0.021^{\circ}\text{C}$ 平均 $+0.019^{\circ}\text{C}$	平均 $+0.028^{\circ}\text{C}$ 個体ばらつき 0.01°C 以下	無酸素銅製の 均熱ブロック を適用
2	応答性を追求した タンク内高精度液面 ポジションセンサ	$\pm 0.05^{\circ}\text{C}$	最大 -0.021°C 平均 -0.019°C	平均 -0.011°C 個体ばらつき 0.01°C 以下	無酸素銅製の 均熱ブロック を適用
3	タンク内各部の モニター用温度センサ	$\pm 0.2^{\circ}\text{C}$	最大 $+0.079^{\circ}\text{C}$ 平均 $+0.069^{\circ}\text{C}$	—	液体水素中に 温度センサを 直接投入
4	船内多用途に対応 する温度センサ	$\pm 0.05^{\circ}\text{C}$	最大 -0.049°C 平均 -0.047°C	平均 -0.008°C 個体ばらつき 約 0.04°C	無酸素銅製の 均熱ブロック を適用
5	表面温度計測用 センサ	$\pm 0.2^{\circ}\text{C}$	最大 $+0.086^{\circ}\text{C}$ 平均 $+0.076^{\circ}\text{C}$	—	液体水素中に 温度センサを 直接投入

5.4 船級承認のための試験及び書類作成

船舶に搭載される機器は、船級協会が定める規則に準じた試験及び承認を経て、船用機器として適合していることを証明する必要がある。5.1.2項にて設計した船用液体水素用温度センサの内、インタンク用高精度温度センサと応答性を追求したタンク内高精度液面ポジションセンサの2種類において船級承認のための試験及び書類作成を実施した。

5.4.1 試験方案の作成及び試験品の製作

世界初の液体水素運搬船に適用される船級「日本海事協会」が定める規則に従い、下記①から⑧に列挙する内容の船級承認のための試験方案を作成した。方案はLNG船向けインタンク用温度センサに適用される試験内容とした。

また、試験対象となる温度センサは船舶に搭載される形状を想定し、導体部の長さを20mにして試験品を製作した。製作した試験品の外観を図75に示す。

- ① 外形図との適合確認 … 申請する外形図をもとにセンサ各部の寸法を評価
- ② 性能試験 … 温度計測における性能検査
- ③ 絶縁抵抗試験 … 極性の異なる導電部間(導電部)と対地間に直流電圧を印可し評価
- ④ 振動試験 … 作動状態の機器に振動を印可して共振点及び耐久性を評価
- ⑤ 温湿度試験 … 温度及び湿度環境を負荷して温度センサの作動状態を評価
- ⑥ 乾燥高温試験 … 高温環境に温度センサを曝して温度センサの作動状態を評価
- ⑦ 低温試験 … 低温環境に温度センサを曝して温度センサの作動状態を評価
- ⑧ 耐電圧試験 … 極性の異なる導電部間(導電部)と対地間に交流電圧を印可して評価

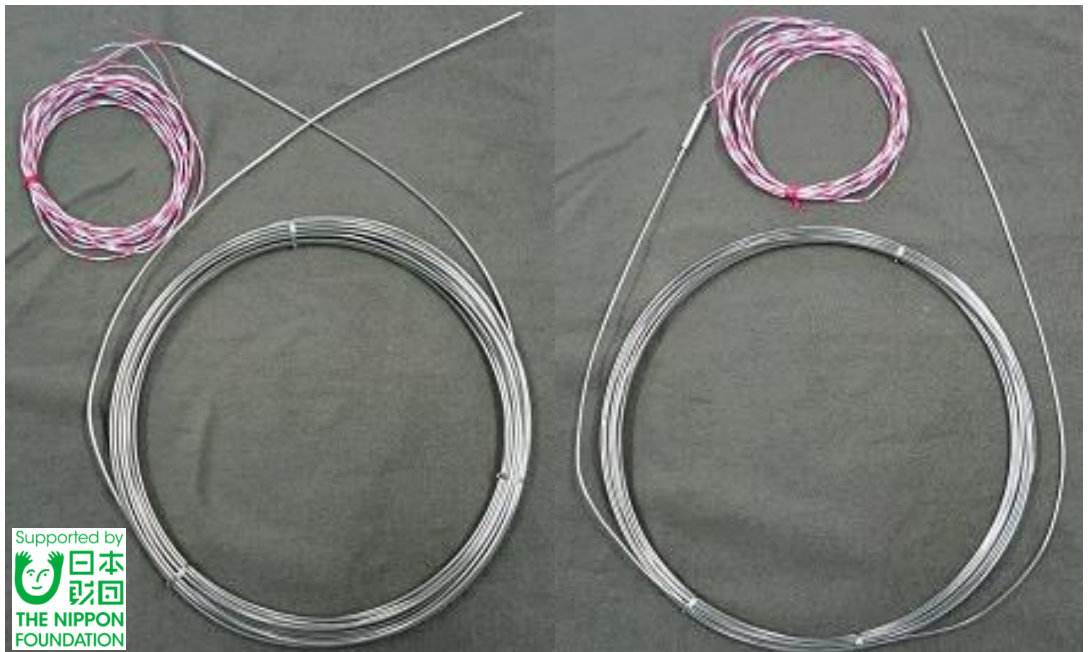


図75. 製作した船級承認のための試験品の外観(導体部長さ20m)

※左：インタンク用高精度温度センサ

※右：タンク内高精度液面ポジションセンサ

5.4.2 船級承認に必要な温度センサの評価試験

船級規則に従い、温度センサの船級承認に必要な評価試験を実施した。5.4.1 項に列挙した試験の内、主要な試験実施記録を図76と図77に示す。

なお、試験品である船用液体水素用温度センサは、全ての試験を通じて合格水準に達していたことを報告する。

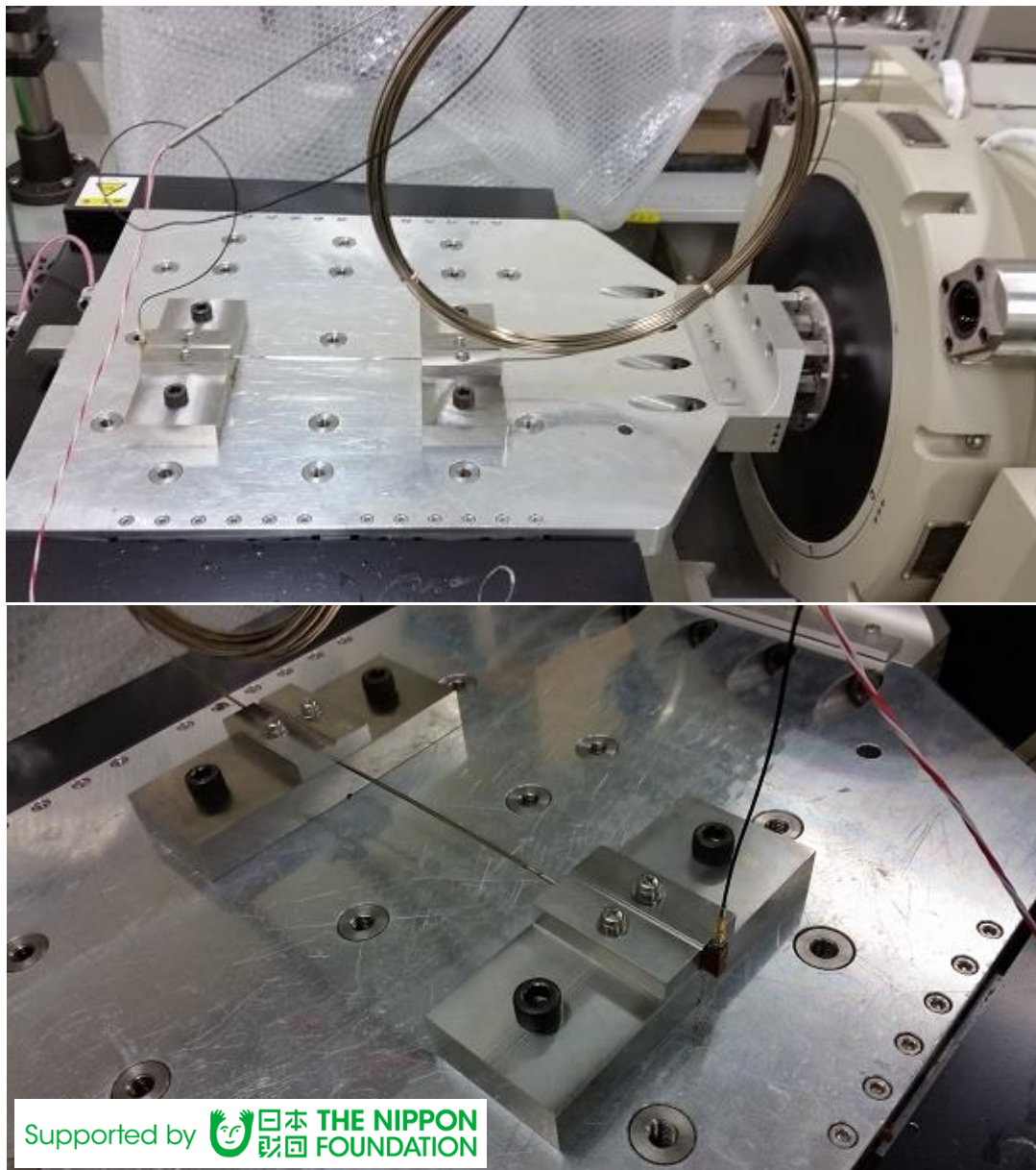


図76. 振動試験の実施記録



図 7.7. 温湿度試験の実施記録

5.4.3 船級承認のための書類作成

5.4.2 項で実施した試験のデータ及び成績書、外形図などの船級承認に必要な書類を作成した。船級規則に準じた全ての評価試験にて合格水準に達し、先に報告した温度計測精度 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ 以内を実現できたことから、国の方針「水素の利活用促進と安価で安定的な供給源の確保」に必要な不可欠な液体水素運搬船に寄与する、船用液体水素用温度センサの技術開発を実施完了した。

5.5 マイクロプロセッサの試作

3.5 項にて実施した温度センサの長寿命化を実現する、温度センサ素子への通電回路設計を軸に、温度監視システムの基幹を成すマイクロプロセッサの設計及び試作を実施したので次に報告する。

5.5.1 マイクロプロセッサの仕様検討

マイクロプロセッサの仕様検討を実施した。船用機器として開発するマイクロプロセッサの仕様検討は、船用特有の環境条件や液体水素の温度計測に必要なと考える機能及び性能について十分考慮して実施した。

1) 温度計測範囲

3.5.6 項 1) の温度監視システムの温度計測範囲の検討結果より水素の沸点以下の温度計測は不要と判断できるが、システム商品としての裕度をもった温度計測範囲とするため、温度計測範囲を $-263^{\circ}\text{C}\sim 100^{\circ}\text{C}$ とした。

2) 計測点数

商品化を見据え監視盤の盤内に設置することを考慮し、LNG船で用いられている現行計測モジュールと同程度の寸法で、マイクロプロセッサに搭載可能な計測点数を検討した。検討の結果、1つのマイクロプロセッサの対象計測点数を2点とし、各々、常用回路2点、予備回路2点を搭載することとした。

3) 温度計測精度

3.5.6 項1)にてシステム製品としての裕度を持たせ高精度計測範囲を -258°C ～ -240°C と設定したが、液体水素の温度計測に本来不要となる高精度計測範囲の裕度を多く持たせることはコストに直結し商品化の妨げになる。従って、システム商品としての適切な裕度を再検討の上、高精度計測範囲及び温度計測精度を決定した。

検討の結果、液体水素運搬船が貨物として扱う液体水素の特性上、特に高精度での温度計測が必要となる温度計測範囲 -253°C ～ -243°C に対し、適切な裕度を持たせた範囲 -255°C ～ -240°C を高精度計測範囲と決定し、その他の温度計測範囲を汎用精度計測範囲とした。また、上述の温度計測範囲におけるマイクロプロセッサとしての計測精度を、 -255°C ～ -240°C の高精度計測範囲において $\pm 0.015^{\circ}\text{C}$ (-0.015°C , $+0.015^{\circ}\text{C}$ 含む)、その他の汎用精度範囲では $\pm 1^{\circ}\text{C}$ とした。

4) 測定電流値

3.5.3 項にて検討した突入電流を抑制する通電回路を、マイクロプロセッサに組み込んだ。マイクロプロセッサの電源投入時や計測開始時には、まず 0.1mA の測定電流を温度センサに通電する。計測された温度値が汎用精度計測範囲の場合は、 0.1mA の測定電流を維持する。計測された温度値が高精度計測範囲の場合は、測定電流を 1mA に切替える通電回路とした。

5) 温度センサへの通電回路の切換え

3.5.4 項にて検討した自動切換え機能を実現するため、マイクロプロセッサに常用、予備用温度センサの切換え回路を搭載することとした。

6) 温度計測精度を保障する周囲温度

3.5.6 項2)の温度計測精度の検討結果より、基準抵抗に精度 $\pm 0.01\%$ ・抵抗値 $3000\ \Omega$ の抵抗を選定した。3.5.6 項2)で算出した温度計測精度は周囲温度 25°C (以降、基準温度 T_0 とする)における精度であり、抵抗値は周囲温度の変動に伴い変化する温度特性変化が存在する。そのため周囲温度を加味し高精度計測範囲 -255°C ～ -240°C における温度計測精度を再度算出し、温度計測精度を保障する周囲温度の検討をした。

なお、選定した基準抵抗の温度抵抗係数は、 $5\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$ である。

温度計測精度を保障する周囲温度の検討には、下記の計算式を用いて基準抵抗の精度に温度抵抗係数を加味し最大、最小の ADC 値を算出した。算出した ADC 値を再び RTD 値 (RTD 再計算値) に変換した。評価は RTD 値と RTD 再計算値との差を温度換算し、その最大値にて行なった。

$$\text{ADC 値} = (\text{RTD} / \text{Rrt} \times \text{PGA} \times (2^{\text{Adbt}} - 1)) \pm \text{ADer} \dots (1)$$

RTD : 温度センサの抵抗値

Rrt : 温度抵抗係数を加味した基準抵抗値

$$\text{Rrt} = (\text{Rref} \times \text{Rt1} + \text{Rref} \times \text{TCR} \times (\text{T0} - \text{T})) + \text{Rref} \dots (2)$$

Rref : 基準抵抗 … 3000 Ω

Rt1 : 基準抵抗の許容差 … ±0.01%

TCR : 温度抵抗係数 … 5×10^{-6}

T : 周囲温度

T0 : 基準温度 … 25°C

PGA : アンプゲイン … $64 \pm 0.02\%$

Adbt : AD 変換器のビット数 … 23

ADer : AD 変換誤差 … ±130

Rrt : (2)式より温度抵抗係数を加味した基準抵抗値の算出例

(表 2 2 に示す周囲温度 $25 \pm 5^\circ\text{C}$ 、計測温度 -255°C の場合)

基準抵抗値の最大値

$$(3000 \times 0.01 / 100 + 3000 \times 5 \times 10^{-6} \times (25 - 20)) + 3000 = 3000.375$$

基準抵抗値の最小値

$$(3000 \times (-0.01) / 100 + 3000 \times 5 \times 10^{-6} \times (25 - 30)) + 3000 = 2999.625$$

(1)式より ADC 最大、最小値の算出例

(表 2 2 に示す周囲温度 $25 \pm 5^\circ\text{C}$ 、計測温度 -255°C の場合)

ADC 最大値

$$(19.846 / 2999.625 \times 64.0128 \times (2^{23} - 1)) + 130 = \text{3552864}$$

ADC 最小値

$$(19.846 / 3000.375 \times 63.9872 \times (2^{23} - 1)) - 130 = \text{3550295}$$

表 2 2 と表 2 3 に周囲温度 $25 \pm 5^\circ\text{C}$ 、 $25 \pm 10^\circ\text{C}$ の ADC 最大及び最小値、並びに温度計測誤差を示す。周囲温度 $25 \pm 5^\circ\text{C}$ にて最大誤差 $\pm 0.0129^\circ\text{C}$ 、周囲温度 $25 \pm 10^\circ\text{C}$ にて最大誤差 $\pm 0.0139^\circ\text{C}$ となった。いずれも温度計測精 $\pm 0.015^\circ\text{C}$ を満足する結果となったが、マイクロプロセッサに用いている他の電子部品の温度特性変化の影響を加味し、精度を保障する周囲温度は $25 \pm 5^\circ\text{C}$ ($20^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$) とした。

表 2 2. 周囲温度 25±5℃の ADC 最大及び最小値

計測温度 (℃)	RTD 抵抗値 (Ω)	ADC 値 (上段：最大値) (下段：最小値)	RTD 再計算値 (Ω)	抵抗誤差 (Ω)	温度誤差 (℃)
-255	19.846	3552864	19.8532	0.0072	0.0098
		3550295	19.8388	-0.0072	-0.0098
-253	21.4238	3835314	21.4315	0.0077	0.0068
		3832562	21.4161	-0.0077	-0.0068
-243	35.4671	6349277	35.4794	0.0123	0.0119
		6344891	35.4548	-0.0123	-0.0119
-240	38.55104	6901348	38.5643	0.0133	0.0129
		6896604	38.5378	-0.0133	-0.0129

表 2 3. 周囲温度 25±10℃の ADC 最大及び最小値

計測温度 (℃)	RTD 抵抗値 (Ω)	ADC 値 (上段：最大値) (下段：最小値)	RTD 再計算値 (Ω)	抵抗誤差 (Ω)	温度誤差 (℃)
-255	19.846	3552952	19.8537	0.0077	0.0105
		3550206	19.8383	-0.0077	-0.0105
-253	21.4238	3835409	21.4320	0.0082	0.0073
		3832466	21.4156	-0.0082	-0.0073
-243	35.4671	6349435	35.4802	0.0131	0.0128
		6344732	35.4540	-0.0131	-0.0128
-240	38.55104	6901521	38.5653	0.0142	0.0139
		6896432	38.5368	-0.0142	-0.0139

7) 動作を保障する周囲温度

動作を保障する周囲温度は、日本海事協会が定める温湿度試験の環境条件 55℃と低温試験の環境条件 5℃を加味し、5℃～55℃とした。

8) 仕様検討のまとめ

5.5.1 項 1) から 7) までに述べた検討結果から、マイクロプロセッサの仕様をまとめた一覧を表 2 4 に記載する。

表 2 4. マイクロプロセッサの仕様一覧

項目	仕様	備考
温度計測範囲	-263℃～100℃	10K～373K
入力信号	PT1000Ω 白金測温抵抗体	—
計測点数(回路数)	2点	常用2・予備2
温度計測精度(-255℃～-240℃)	±0.015℃	高精度計測範囲
温度計測精度 (-263℃～-255℃)(-240℃～100℃)	±1℃	汎用精度計測範囲
測定電流値(-255℃～-240℃)	1mA	高精度計測範囲
測定電流値 (-263℃～-255℃)(-240℃～100℃)	0.1mA	汎用精度計測範囲
温度計測精度を保障する周囲温度	20℃～30℃	—
動作を保障する周囲温度	5℃～55℃	—

5.5.2 マイクロプロセッサの設計

5.5.1 項にて検討した仕様をもとに、マイクロプロセッサの設計を実施した。

1) 外観及び構成

マイクロプロセッサのブロック図を図 7 8 に外形図を図 7 9 に示す。

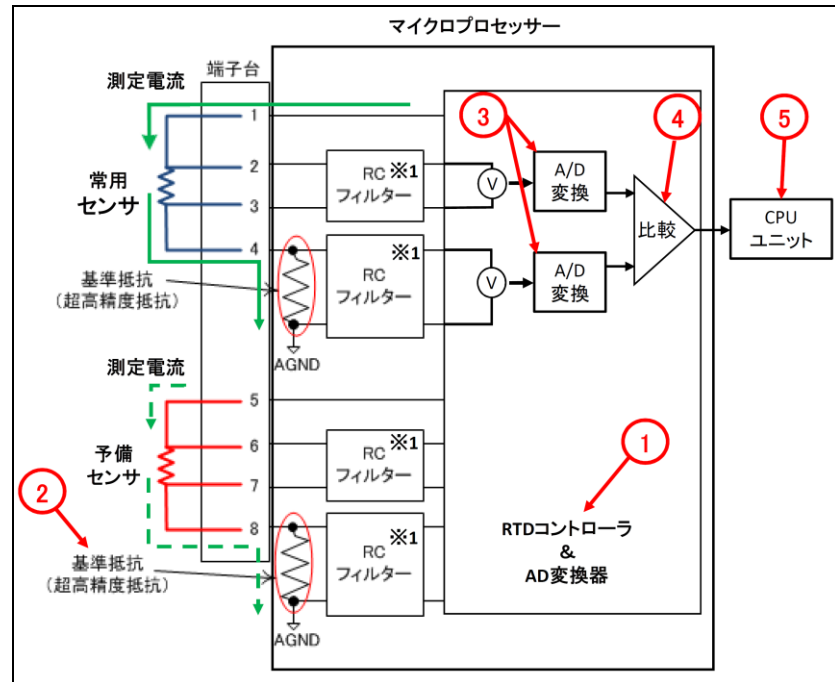


図 7 8. マイクロプロセッサのブロック図

※1. RC(Resistance Capacitance)フィルタ…抵抗とコンデンサによって構成されたノイズ除去回路

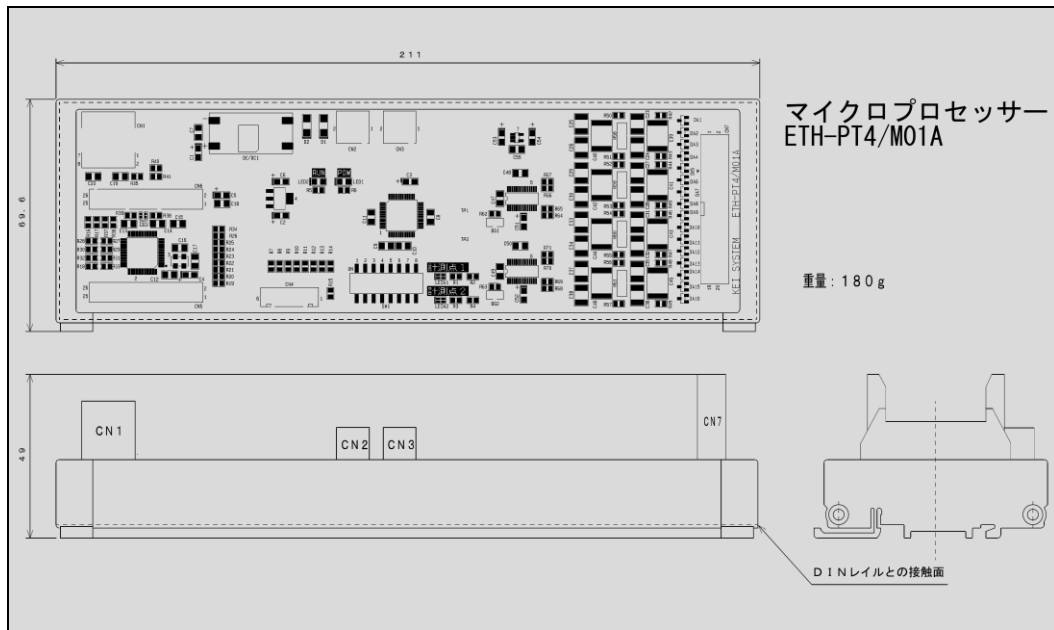


図 7.9. マイクロプロセッサの外形図

2) 動作説明

図 7.8 に示したブロック図をもとに、マイクロプロセッサの回路説明を表 2.5 に取り纏め記載する。

表 2.5. マイクロプロセッサの回路説明

No.	動作内容
①	RTD コントローラにて、温度センサ素子に通電する測定電流 0.1mA、1mA の切換えを行う。
②	高精度な基準抵抗を適用することにより、 $\pm 0.015^{\circ}\text{C}$ の精度を実現する。
③	温度センサと基準抵抗からフィードバックされた電圧は、AD 変換器により、電圧値(アナログ信号)から ADC 値に変換する。
④	温度センサと基準抵抗の ADC 値の比を温度表示用のデータとし、CPU ユニットに伝送する。
⑤	CPU ユニットにて常用温度センサの断線、短絡による異常を検知した場合、通電回路を常用温度センサから予備用温度センサに自動的に切換える。通電回路の切換え時には温度センサ素子への突入電流を抑制する。

5.5.3 マイクロプロセッサの試作

5.5.2 項に報告した設計をもとに、マイクロプロセッサを試作した。試作したマイクロプロセッサ外観を図 8.0 に示す。

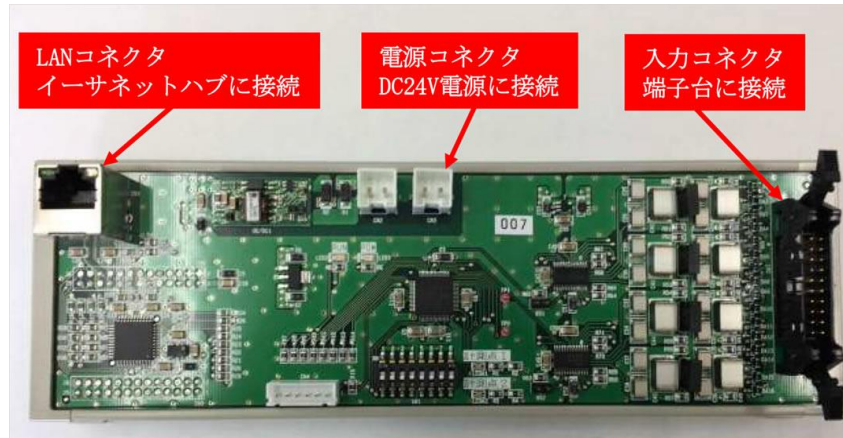


図80. マイクロプロセッサ外観

5.5.4 マイクロプロセッサの機能及び性能評価

5.5.3 項にて試作したマイクロプロセッサを用いた機能及び性能における評価試験を実施した。

1) 温度計測精度の評価試験内容

試作したマイクロプロセッサの温度計測精度が、高精度計測範囲にて $\pm 0.015^{\circ}\text{C}$ 、汎用精度計測範囲にて $\pm 1^{\circ}\text{C}$ を満足するかを確認する評価方法を次の①から⑤に示す。

- ① 評価試験に用いるマイクロプロセッサは1台、試験対象回路は4回路(常用2・予備2)とする。
- ② 図81に示す温度計測精度評価試験の機器構成にて評価を実施する。
- ③ 国家・国際標準にトレーサビリティがとれた精密可変抵抗器よりマイクロプロセッサに、 $-255^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$ 相当の抵抗値を入力する。入力された抵抗信号をマイクロプロセッサにてADC値に変換し、ノートパソコンに抵抗値を表示する。
- ④ 図82の精密可変抵抗器の出力値を、高精度な抵抗計測器で計測しその値を評価基準値とする。
- ⑤ この評価基準値とノートパソコンに表示されたマイクロプロセッサが計測した抵抗値の差を温度値に換算し、温度計測精度を算出する。

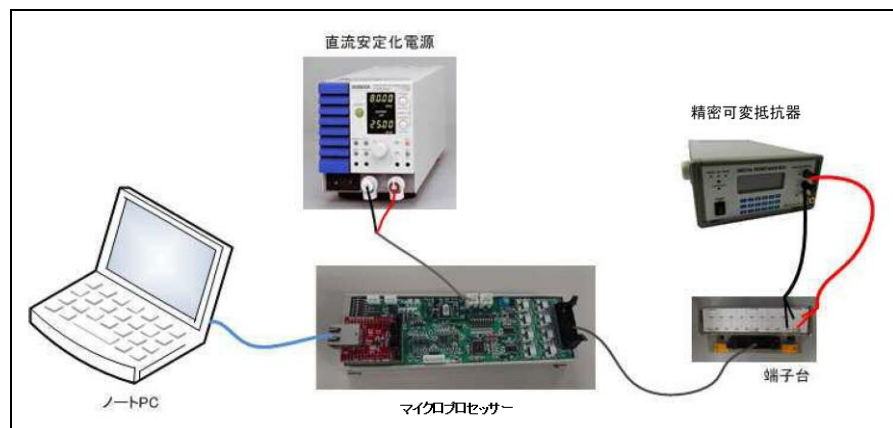


図81. 温度計測精度評価試験の機器構成



図 8 2. 評価基準値の計測

2) 温度計測精度の評価結果

試作したマイクロプロセッサが設計段階で決定した高精度計測範囲の温度計測精度±0.015℃、汎用精度計測範囲の計測精度±1℃を満足することを実証した。評価時の最大誤差を抜粋して報告した表 2 6 と表 2 7 を示す。

評価結果として、試作したマイクロプロセッサの高精度計測範囲における最大誤差は 0.00799℃、汎用精度計測範囲では最大誤差は 0.23162℃であった。

表 2 6. マイクロプロセッサの温度計測精度の評価結果(高精度計測範囲)

計測点	温度(℃) ※1	基準値(Ω)	表示値(Ω)	抵抗誤差(Ω)	温度誤差(℃) ※2
計測点 2 常用回路	-255	19.8813	19.887	0.0057	0.00799
	-253	21.4434	21.450	0.0066	0.00727
	-243	35.5649	35.576	0.0111	0.00546
	-240	42.1520	42.165	0.0130	0.00583
計測点 2 予備回路	-255	19.8813	19.887	0.0057	0.00799
	-253	21.4434	21.449	0.0056	0.00617
	-243	35.5649	35.575	0.0101	0.00496
	-240	42.1520	42.164	0.0120	0.00539

※1. 温度は評価する抵抗値を、液体水素を用いた試験時の基準温度が示したもの

※2. 温度誤差は抵抗誤差を温度換算したもの

(上記※1及び※2は表 2 6 から表 3 1 まで適用する)

表 2 7. マイクロプロセッサの温度計測精度の評価結果(汎用精度計測範囲)

計測点	温度(°C)	基準値(Ω)	表示値(Ω)	抵抗誤差(Ω)	温度誤差(°C)
計測点 1 常用回路	-263	16. 8335	16. 837	0. 0035	0. 02403
	-256	19. 2374	19. 242	0. 0046	0. 00738
	0	1000. 0080	1000. 661	0. 6530	0. 16744
	100	1385. 1250	1385. 982	0. 8570	0. 23162
計測点 1 予備回路	-263	16. 8335	16. 837	0. 0035	0. 02403
	-256	19. 2374	19. 241	0. 0036	0. 00578
	0	1000. 0080	1000. 649	0. 6410	0. 16436
	100	1385. 1250	1385. 967	0. 8420	0. 22757

3) 実装環境を考慮した温度計測精度の評価試験

5. 5. 4 項 2) にて試作したマイクロプロセッサが設計段階で決定した温度計測精度を満足することを実証したが、本開発品は船用機器であるため液体水素運搬船の実装環境に近い状態で評価を実施することとした。検討した評価方法を次の①から⑤に示す。

- ① 液体水素運搬船では温度センサは液体水素が格納されるタンク内に設置され、マイクロプロセッサは監視室等の居住区に設置される。タンクと監視室の距離は数十 m と想定されることから、この電送距離が温度計測精度に与える影響を確認するため精密可変抵抗器とマイクロプロセッサ間のケーブル長を 100m とする。
- ② 液体水素運搬船にて温度センサは、危険場所(防爆区画)に設置される。危険場所に設置される温度センサには、過電圧や過電流による過度な電気エネルギーが印加されるのを防止するためツェナバリアが適用される。このツェナバリアが温度計測精度に与える影響を確認するため、精密可変抵抗器とマイクロプロセッサの間にツェナバリアを接続する。
- ③ 評価試験に用いるマイクロプロセッサは 1 台(常用 2・予備 2)とする。
- ④ 図 8 3 に示す実装環境を考慮した温度計測精度評価試験の機器構成にて評価試験を実施する。
- ⑤ 評価方法は 5. 5. 4 項 1) と同一とする。

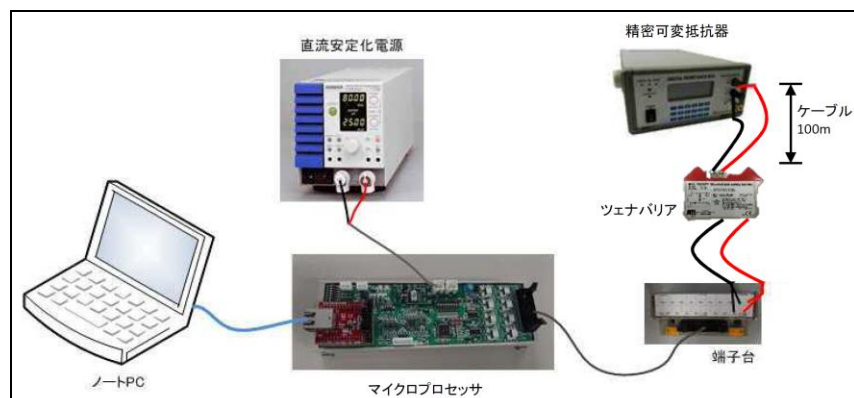


図 8 3. 実装環境を考慮した温度計測精度評価試験の機器構成

4) 実装環境を考慮した温度計測精度の評価結果

実装環境に近い状態で、試作したマイクロプロセッサが高精度計測範囲において温度計測精度 $\pm 0.015^{\circ}\text{C}$ 、汎用精度計測範囲にて温度計測精度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ を満足することを実証した。

評価結果として、試作したマイクロプロセッサの高精度計測範囲における最大誤差は 0.00659°C 、汎用精度範囲の最大誤差は 0.22649°C であった。実装環境を考慮した評価時の最大誤差を抜粋して報告した表28と表29を示す。

表28. 実装環境を考慮した温度計測精度の評価結果(高精度計測範囲)

計測点	温度($^{\circ}\text{C}$)	基準値(Ω)	表示値(Ω)	抵抗誤差(Ω)	温度誤差($^{\circ}\text{C}$)
計測点2 常用回路	-255	19.8813	19.886	0.0047	0.00659
	-253	21.4434	21.449	0.0056	0.00617
	-243	35.5649	35.576	0.0111	0.00546
	-240	42.1520	42.164	0.0120	0.00539
計測点2 予備回路	-255	19.8813	19.886	0.0047	0.00659
	-253	21.4434	21.448	0.0046	0.00507
	-243	35.5649	35.576	0.0111	0.00546
	-240	42.1520	42.165	0.0130	0.00583

表29. 実装環境を考慮した温度計測精度の評価結果(汎用精度計測範囲)

計測点	温度($^{\circ}\text{C}$)	基準値(Ω)	表示値(Ω)	抵抗誤差(Ω)	温度誤差($^{\circ}\text{C}$)
計測点1 常用回路	-263	16.8335	16.837	0.0035	0.02403
	-256	19.2374	19.241	0.0036	0.00578
	-239	44.3804	44.386	0.0056	0.00251
	0	1000.0080	1000.663	0.6550	0.16795
	100	1385.1250	1385.959	0.8340	0.22541
計測点1 予備回路	-263	16.8335	16.837	0.0035	0.02403
	-256	19.2374	19.241	0.0036	0.00578
	-239	44.3804	44.382	0.0016	0.00072
	0	1000.0080	1000.658	0.6500	0.16667
	100	1385.1250	1385.963	0.8380	0.22649

5) 周囲温度変動を加味した温度計測精度の評価試験

試作したマイクロプロセッサが保障する周囲温度 $20\sim 30^{\circ}\text{C}$ にて、温度計測精度 $\pm 0.015^{\circ}\text{C}$ (高精度計測範囲)、温度計測精度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ (汎用精度計測範囲)を満足するか、また動作を保障する周囲温度 $5\sim 55^{\circ}\text{C}$ にて正常に計測するか(温度計測精度は問わない)を評価した。評価の方法を次の①から③に示す。

- ① 評価試験対象のマイクロプロセッサは1台、対象回路は2回路(常用2)とする。
- ② 図8-4に示す機器及び環境の構成にて周囲温度変動を加味した温度計測精度の評価を実施する。
- ③ マイクロプロセッサのみ恒温槽内に設置し、周囲温度「5℃, 20℃, 25℃, 30℃, 55℃」に変動させて抵抗値を計測する。評価方法は5.5.4項1)と同一とする。

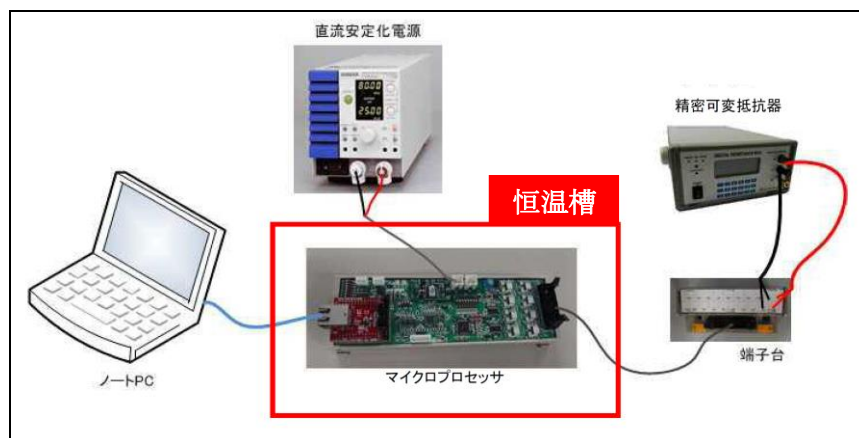


図8-4. 周囲温度変動を加味した計測精度評価の機器及び環境構成

6) 周囲温度変動を加味したマイクロプロセッサの温度計測精度の評価結果

試作したマイクロプロセッサが精度を保障する周囲温度 20℃～30℃の環境条件にて、高精度計測範囲の温度計測精度±0.015℃、汎用精度範囲の計測精度±1℃を満足した。更に、動作保障範囲の周囲温度 5℃～55℃においても同様の結果を得た。表3-0と表3-1に周囲温度を変動させた時の温度計測精度の結果を抜粋して報告する。

表3-0. 周囲温度変動を加味した温度計測精度の評価結果(計測点1 常用回路)

周囲温度(℃)	温度(℃)	基準値(Ω)	表示値(Ω)	抵抗誤差(Ω)	温度誤差(℃)
5℃	-255	19.8813	19.887	0.0057	0.00799
	-253	21.4434	21.449	0.0056	0.00617
	100	1385.1250	1385.976	0.8510	0.23000
20℃	-255	19.8813	19.886	0.0047	0.00659
	-253	21.4434	21.449	0.0056	0.00617
	100	1385.1250	1385.981	0.8560	0.23135
30℃	-255	19.8813	19.886	0.0047	0.00659
	-253	21.4434	21.448	0.0046	0.00507
	100	1385.1250	1385.977	0.8520	0.23027
55℃	-255	19.8813	19.886	0.0047	0.00659
	-253	21.4434	21.448	0.0046	0.00507
	100	1385.1250	1385.993	0.8680	0.23459

表 3 1 . 周囲温度変動を加味した温度計測精度の評価結果(計測点 2 常用回路)

周囲温度(°C)	温度(°C)	基準値(Ω)	表示値(Ω)	抵抗誤差(Ω)	温度誤差(°C)
5°C	-255	19.8813	19.888	0.0067	0.00939
	-253	21.4434	21.451	0.0076	0.00837
	100	1385.1250	1000.535	0.5220	0.13385
20°C	-255	19.8813	19.887	0.0057	0.00799
	-253	21.4434	21.450	0.0066	0.00727
	100	1385.1250	1385.811	0.6860	0.18541
30°C	-255	19.8813	19.887	0.0057	0.00799
	-253	21.4434	21.450	0.0066	0.00727
	100	1385.1250	1385.814	0.6890	0.18622
55°C	-255	19.8813	19.887	0.0057	0.00799
	-253	21.4434	21.450	0.0066	0.00727
	100	1385.1250	1000.552	0.5390	0.13821

7) 測定電流値切換え回路の評価試験

試作したマイクロプロセッサに組込んだ、測定電流値 1mA(高精度計測範囲)と 0.1mA(汎用精度計測範囲)の電流値切換え機能が正常に動作することを確認した。評価方法を次の①から⑦に示す。

- ① 評価試験に用いるマイクロプロセッサは 1 台 4 回路(常用 2・予備 2)とする。
- ② 図 8 5 に示す測定電流値切換えの機器構成にて評価を実施する。
- ③ 精密可変抵抗器よりマイクロプロセッサに、高精度計測範囲と汎用精度計測範囲の境界にあたる抵抗値を入力する。
- ④ 入力する抵抗値は、測定電流値 1mA で計測される-240°C相当の抵抗値 42.151Ω(高精度計測範囲の上限温度)と、測定電流値 0.1mA で計測される-240.5°C相当の抵抗値 43.265Ω(汎用精度計測範囲の下限温度)とする。
- ⑤ オシロスコープで、精密可変抵抗器の出力値(42.151Ω又は43.265Ω)と基準抵抗(3000Ω)の両端に印加される電圧を計測する。(図 8 6 参照)
- ⑥ 計測した電圧値をオームの法則($I=V/R$)を用いて電流値に換算する。
※抵抗 R は精密可変抵抗器の出力値+基準抵抗(マイクロプロセッサ内部)
- ⑦ 温度センサに通電される 1mA と 0.1mA の測定電流値は RTD コントローラより出力される。RTD コントローラから出力される測定電流値の精度は、3.4.5 項 3) 測定電流による読取り誤差の検証にて評価した 1mA±6%となるため、切換え機能の確認とともに電流値の精度検証も実施する。

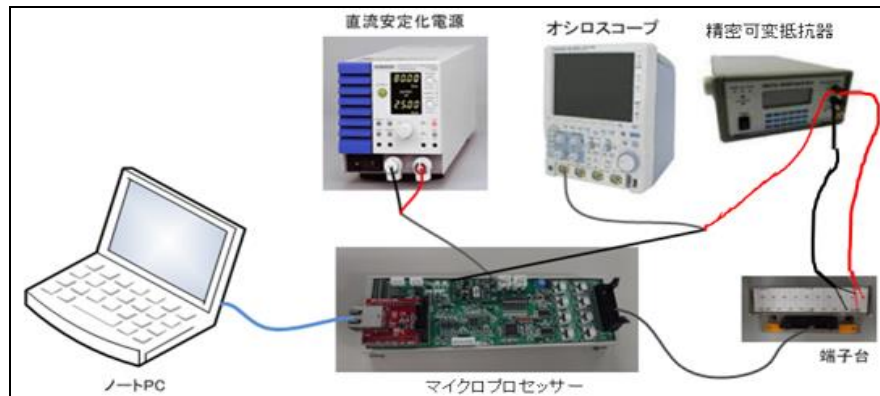


図 8 5. 測定電流値切換え回路の評価試験の機器構成

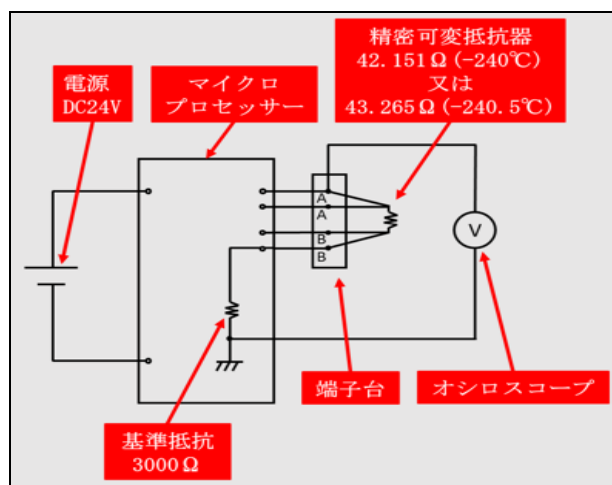


図 8 6. 測定電流値評価試験の計測回路

8) 測定電流値切換え回路の評価結果

測定電流値切換え回路が正常に機能することを確認した。表 3 2 の評価結果に示すように試作したマイクロプロセッサの測定電流値は高精度計測範囲で 1.045mA、汎用精度計測範囲で 0.138mA であり、高精度な温度計測に必要な電流値精度を確保している。

表 3 2. 抵抗への印加電圧より算出した測定電流値

計測点	抵抗値(Ω)	電圧値(V)	電流値(mA)
計測点 1 常用	3042.151	3.14	1.032
	3043.265	0.42	0.138
計測点 1 予備	3042.151	3.13	1.029
	3043.265	0.43	0.141
計測点 2 常用	3042.151	3.18	1.045
	3043.265	0.41	0.135
計測点 2 予備	3042.151	3.15	1.035
	3043.265	0.42	0.138

9) 突入電流を抑制する通電回路の評価試験

5.5.4 項 8) にて評価試験を実施した測定電流値切換え回路において、センサ素子の長寿命化を目的とした突入電流の抑制が期待通りに機能しているか確認した。評価方法を次の①から⑤に示す。

- ① 評価するマイクロプロセッサは 1 台、試験対象回路は 4 回路(常用 2・予備 2)とする。
- ② オシロスコープで、固定抵抗と基準抵抗(3000Ω)の両端に印加される電圧と DC24V 電源の電圧を計測する。(図 8 7 参照)
- ③ 固定抵抗は、液体水素の沸点である -253°C で船用液体水素用温度センサが示す抵抗値一例と等しい 21.6Ω とする。
- ④ 計測回数 10 回の電源投入時のピーク電圧計測値の平均値を採用する。
- ⑤ 計測した電圧値をオームの法則($I=V/R$)を用いて電流値に換算し、この電流値の平均によって評価を行う。

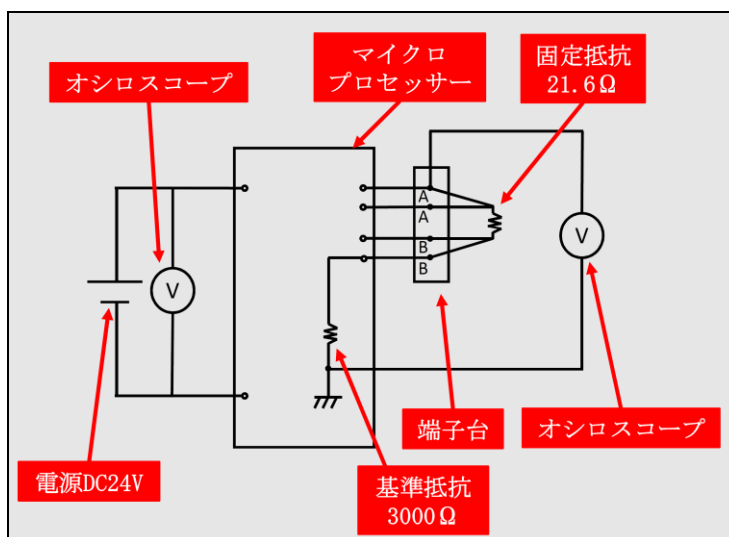


図 8 7. 突入電流計測回路の概要図

1 0) 突入電流を抑制する通電回路の評価結果

5.5.4 項 9) に述べた方法により調査した結果、突入電流の大きさを示すピーク電流値の平均値は、計測点 1 の常用回路にて 0.143mA となった。この結果は、3.5.1 項 2) にて調査した現行計測モジュールのピーク電流値の平均値 11.2mA に対し、70 分の 1 以下に削減されたことを示し、ピーク電流値が高精度計測範囲の測定電流値 1mA 以下であることから、試作したマイクロプロセッサの通電回路が突入電流を抑制してセンサ素子の長寿命化を実現すると判断する。

表 3 3 と表 3 4 に各計測点の抵抗への印加電圧より算出したピーク電流値を示す。また図 8 8 にオシロスコープにて最大のピーク電圧値 462mV (電流値 0.153mA) を計測したときの波形データを示す。

表 3 3. 計測点 1 抵抗への印加電圧より算出したピーク電流値

計測回路	計測回	電圧 (mV)	電流 (mA)	計測回路	計測回	電圧 (mV)	電流値 (mA)
計測点 1 常用回路	1	455	0.151	計測点 1 予備回路	1	363	0.120
	2	415	0.137		2	361	0.119
	3	415	0.137		3	375	0.124
	4	425	0.141		4	351	0.116
	5	438	0.145		5	359	0.119
	6	442	0.146		6	383	0.127
	7	438	0.145		7	375	0.124
	8	436	0.144		8	359	0.119
	9	435	0.144		9	355	0.117
	10	435	0.144		10	399	0.132
平均値	433.4	0.143	平均値	368.0	0.122		

表 3 4. 計測点 2 抵抗への印加電圧より算出したピーク電流値

計測回路	計測回	電圧 (mV)	電流 (mA)	計測回路	計測回	電圧 (mV)	電流値 (mA)
計測点 2 常用回路	1	383	0.127	計測点 2 予備回路	1	399	0.132
	2	387	0.128		2	395	0.131
	3	391	0.129		3	393	0.130
	4	387	0.128		4	395	0.131
	5	388	0.128		5	399	0.132
	6	385	0.127		6	396	0.131
	7	386	0.128		7	396	0.131
	8	462	0.153		8	396	0.131
	9	431	0.143		9	397	0.131
	10	425	0.141		10	398	0.132
平均値	402.5	0.133	平均値	396.4	0.131		

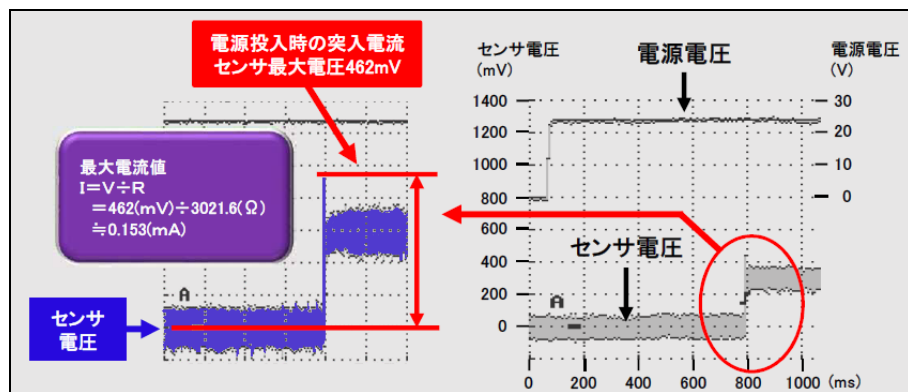


図 8 8. 最大電圧値 462mV 計測時の波形データ

1 1) マイクロプロセッサの機能及び性能評価のまとめ

マイクロプロセッサの機能及び性能評価として、測定電流値切換え回路が正常に機能し、現行計測モジュールと比較して突入電流を 70 分の 1 以下に削減する回路を実現した。また、ツェナバリアとケーブル長さ 100m を接続した状態においても温度計測精度が $\pm 0.015^{\circ}\text{C}$ を満足することから液体水素運搬船の実装環境に適した機器であることを確認した。

5.5.5 マイクロプロセッサにおける船級承認の適否を確認する事前試験

電子機器は外部から強力な電磁波が加わると、意図しない動作を引き起こし、本来の動作を妨げる場合がある。これは舶用機器においても同様に無線機等の通信機器やポンプなど動力機器から発生する電磁ノイズが、電子機器の誤動作を引き起こすことがある。船舶に搭載する電子機器の船級承認試験には、電磁ノイズに対する耐性を確認する電磁両立性試験(以降、EMC試験とする)が必須項目となっている。

試作したマイクロプロセッサの電子部品と温度計測回路の電磁ノイズに対する耐性を確認するため、船級承認の適否を確認する事前試験としてEMC試験を実施したので以下に報告する。

【注記】電磁両立性試験：電気機器などが機器内部および外部からの妨害電磁波に対しその機能・動作が阻害されないかを測定する耐性試験

1) EMC試験の評価方法

EMC試験の評価項目は、液体水素運搬船への搭載を見据え、日本海事協会の鋼船規則に定められている以下の①から③の項目を実施し、試験方法及び判定基準も同規則に準じた。

- ① 高周波放射電磁界イミュニティ試験
- ② 伝導高周波妨害イミュニティ試験
- ③ ファースト・トランジェント/バースト・イミュニティ試験

2) 高周波放射電磁界イミュニティ試験の評価方法

高周波放射電磁界イミュニティ試験の評価方法を、次の①から④に示す。

- ① 図89と図90に示すようにアンテナから 3m の位置にマイクロプロセッサと電源装置を収納したローカルボックスを設置し、各信号線(イーサネットライン、温度センサ入力ライン、電源ライン)に電磁波を照射する。
- ② 図91に示すX面、Y面、Z面に対し、電磁波の振幅方向(アンテナの向き)を水平、垂直に切替えて、周波数 80MHz~2GHz の電磁波を照射する。
- ③ 評価に用いるマイクロプロセッサは 1 台、試験対象回路は常用 1 回路とする。
- ④ マイクロプロセッサに温度センサの疑似信号として、ダイヤル可変抵抗器より抵抗を入力し、温度計測を行った状態で電磁波を照射する。試験中、試験後も温度計測精度 $\pm 0.015^{\circ}\text{C}$ を満足するか検証する。

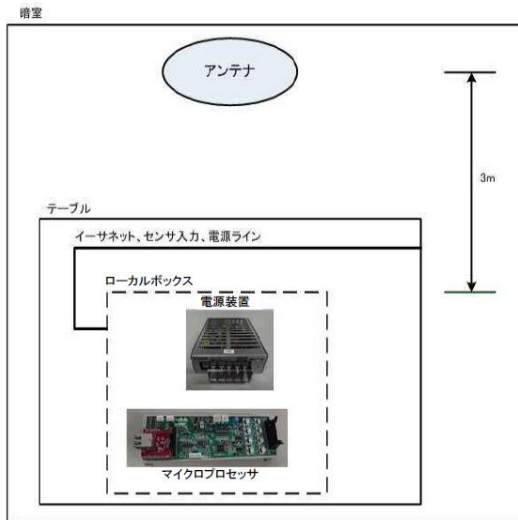


図 8 9. 高周波放射電磁界イミュニティ試験の機器配置

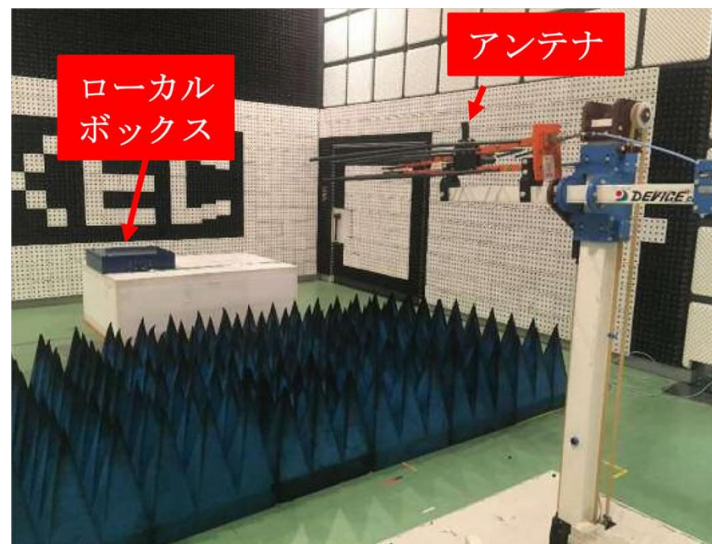


図 9 0. 高周波放射電磁界イミュニティ試験の状態

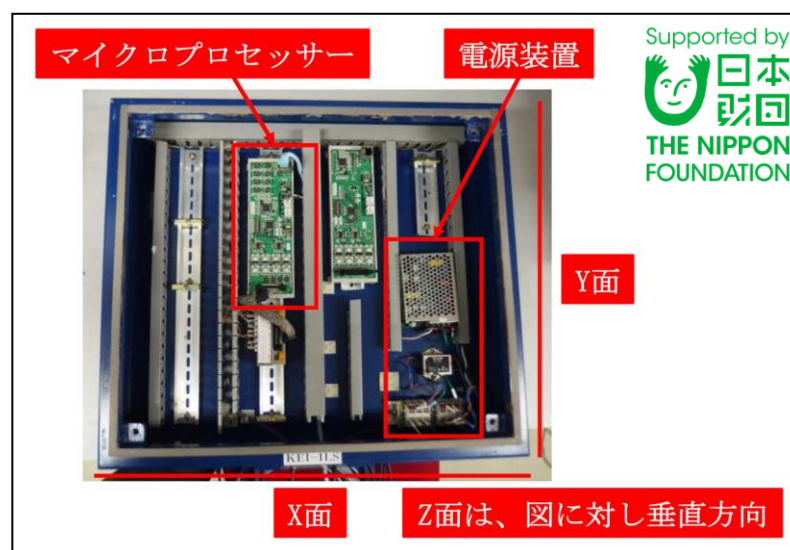


図 9 1. ローカルボックス内の機器配置

3) 高周波放射電磁界イミュニティ試験の評価結果

表 3 5 の高周波放射電磁界イミュニティの試験結果に示す通り、試作したマイクロプロセッサが試験中及び試験前後ともに温度計測精度 $\pm 0.015^{\circ}\text{C}$ を満足することを実証した。

表 3 5. 高周波放射電磁界イミュニティの試験結果

方向	照射面	状態	基準値(Ω)	表示値(Ω)	抵抗誤差(Ω)	温度誤差($^{\circ}\text{C}$)※
アンテナ 水平	X 面	試験前	21.4462	21.454	0.0078	0.0086
		試験中	21.4462	21.454	0.0078	0.0086
		試験後	21.4462	21.454	0.0078	0.0086
	Y 面	試験前	21.4462	21.455	0.0088	0.0097
		試験中	21.4462	21.455	0.0088	0.0097
		試験後	21.4462	21.455	0.0088	0.0097
	Z 面	試験前	21.4462	21.455	0.0088	0.0097
		試験中	21.4462	21.455	0.0088	0.0097
		試験後	21.4462	21.455	0.0088	0.0097
アンテナ 垂直	X 面	試験前	21.4462	21.455	0.0088	0.0097
		試験中	21.4462	21.455	0.0088	0.0097
		試験後	21.4462	21.455	0.0088	0.0097
	Y 面	試験前	21.4462	21.455	0.0088	0.0097
		試験中	21.4462	21.455	0.0088	0.0097
		試験後	21.4462	21.455	0.0088	0.0097
	Z 面	試験前	21.4462	21.455	0.0088	0.0097
		試験中	21.4462	21.455	0.0088	0.0097
		試験後	21.4462	21.455	0.0088	0.0097

※温度誤差は抵抗誤差を温度換算したものの(表 3 5 から表 3 7 まで適用する)

4) 伝導高周波妨害イミュニティ試験の評価方法

伝導高周波妨害イミュニティ試験の評価方法を、次の①から③に示す。

- ① 図 9 2 に示すように、マイクロプロセッサの電源ライン、温度センサ入力ライン、イーサネットラインを試験機材に接続し、各ラインに 150kHz~80MHz の高周波電圧を印加する。
- ② 評価に用いるマイクロプロセッサは 1 台、試験対象回路は常用 1 回路とする。
- ③ マイクロプロセッサに温度センサの疑似信号として、ダイヤル可変抵抗器より抵抗を入力し、温度計測を行った状態で高周波電圧を印加する。試験中、試験後も温度計測精度 $\pm 0.015^{\circ}\text{C}$ を満足するか検証する。

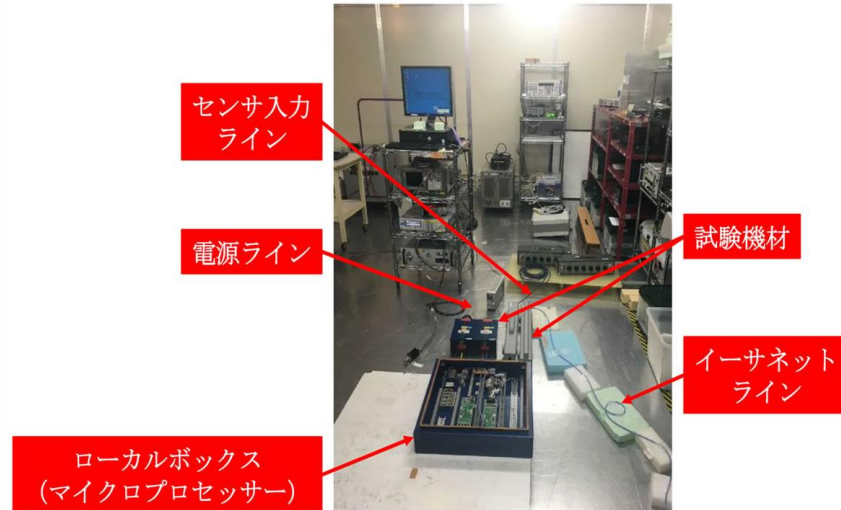


図 9 2. 伝導高周波妨害イミュニティ試験の構成

5) 伝導高周波妨害イミュニティの試験結果

表 3 6 の伝導高周波妨害イミュニティの試験結果に示す通り、試作したマイクロプロセッサが試験中及び試験前後ともに温度計測精度 $\pm 0.015^{\circ}\text{C}$ を満足することを実証した。

表 3 6. 伝導高周波妨害イミュニティの試験結果

印加ライン	状態	基準値(Ω)	表示値(Ω)	抵抗誤差(Ω)	温度誤差($^{\circ}\text{C}$)
温度センサ 入力ライン	試験前	21.4462	21.454	0.0078	0.0086
	試験中	21.4462	21.454	0.0078	0.0086
	試験後	21.4462	21.454	0.0078	0.0086
イーサネット ライン	試験前	21.4462	21.454	0.0078	0.0086
	試験中	21.4462	21.454	0.0078	0.0086
	試験後	21.4462	21.454	0.0078	0.0086
電源ライン	試験前	21.4462	21.454	0.0078	0.0086
	試験中	21.4462	21.454	0.0078	0.0086
	試験後	21.4462	21.454	0.0078	0.0086

6) ファースト・トランジェント/バースト・イミュニティ試験の評価方法

過大なノイズを印加して機器を誤作動させノイズを除いた後に機器の動作が正常に復帰するかを評価する、ファースト・トランジェント/バースト・イミュニティ試験の評価方法を、次の①から④に示す。

- ① 図 9 3 に示すように、マイクロプロセッサの電源ライン、温度センサ入力ライン、イーサネットラインを試験機材に接続する。
- ② 各ラインに繰り返しの速い高周波ノイズを印加する。(図 9 4 参照)

- ③ 評価に用いるマイクロプロセッサは1台、試験対象回路は常用1回路とする。
- ④ マイクロプロセッサに温度センサの疑似信号として、ダイヤル可変抵抗器より抵抗を入力し、温度計測を行った状態で各ラインに高周波ノイズを印加する。試験後に機器の動作が正常に復帰し、温度計測精度 $\pm 0.015^{\circ}\text{C}$ を満足するか確認する。但し、試験中の温度計測精度は問わない。

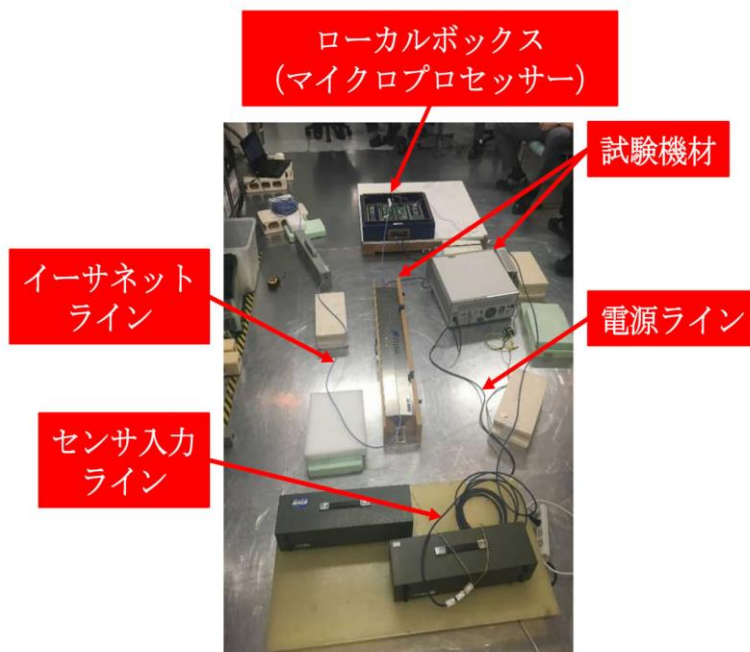


図9 3. ファースト・トランジェント/バースト・イミュニティ試験の機器構成

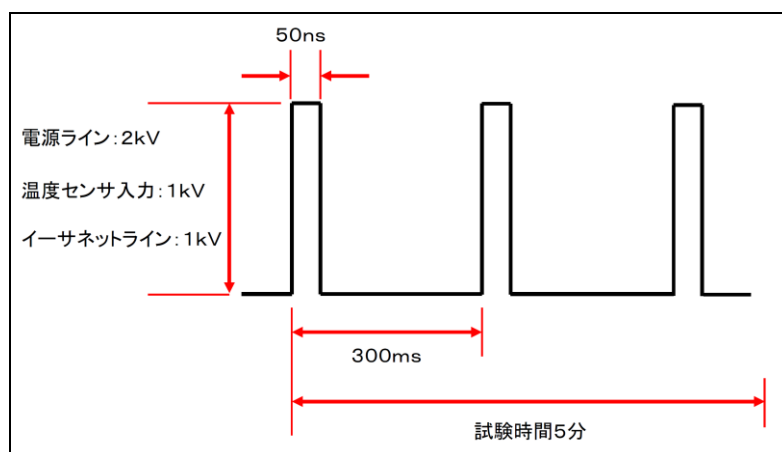


図9 4. 各ライン印加する繰り返しの速い高周波ノイズ

7) ファースト・トランジェント/バースト・イミュニティの試験結果

試作したマイクロプロセッサが、試験後に計測精度 $\pm 0.015^{\circ}\text{C}$ を満足することを実証した。表3 7にファースト・トランジェント/バースト・イミュニティの試験結果を示す。

表37. ファースト・トランジェント/バースト・イミュニティの試験結果

印加ライン	状態	基準値(Ω)	表示値(Ω)	抵抗誤差(Ω)	温度誤差(℃)
温度センサ 入力ライン	試験前	21.4462	21.455	0.0088	0.0097
	試験中	21.4462	21.462	0.0158	0.0174
	試験後	21.4462	21.455	0.0088	0.0097
イーサネット ライン	試験前	21.4462	21.456	0.0098	0.0108
	試験中	21.4462	21.458	0.0118	0.0130
	試験後	21.4462	21.456	0.0098	0.0108
電源ライン	試験前	21.4462	21.454	0.0078	0.0086
	試験中	21.4462	21.703	0.2568	0.2829
	試験後	21.4462	21.456	0.0098	0.0108

8) EMC試験のまとめ

EMC試験の結果、試作したマイクロプロセッサは、日本海事協会の要求する性能を確保していることを確認した。日本海事協会の規則に準じたEMC試験において、温度計測精度±0.015℃であることは船級要求を十分に満足することと置き換えられる。即ち、海上を航行する船内に適合した機器である。

5.6 温度監視システムのための配線システムの試作

ネットワークの冗長性向上と舶用電線から通信用電線への置換えによる電線重量の削減を軸に、温度センサが計測する液体水素温度の見える化を実現する、温度監視システムのための配線システムの設計及び試作を実施した。なお、5.5項にて試作したマイクロプロセッサは当該配線システムに搭載される。

5.6.1 配線システムの仕様及び機器構成検討

舶用機器として開発する配線システムの検討を実施した。検討は液体水素運搬船向けの温度監視に必要と考える機能及び性能について考慮して実施した。

1) マイクロプロセッサから温度監視装置の通信方式

LNG船で用いられる現行計測モジュールは、温度監視装置との通信にシリアル通信を用いている。図95に示すように、シリアル通信は通信ラインに異常が発生した場合に異常発生箇所から下位層の計測モジュール全てが、温度監視装置と通信不能となってしまう。

本事業にて開発するマイクロプロセッサでは、通信ラインに異常が発生した場合のリスクに備え、図96に示すイーサネット通信によりマイクロプロセッサが個々に温度監視装置と通信を行う。これによりネットワークの冗長性が確保される。

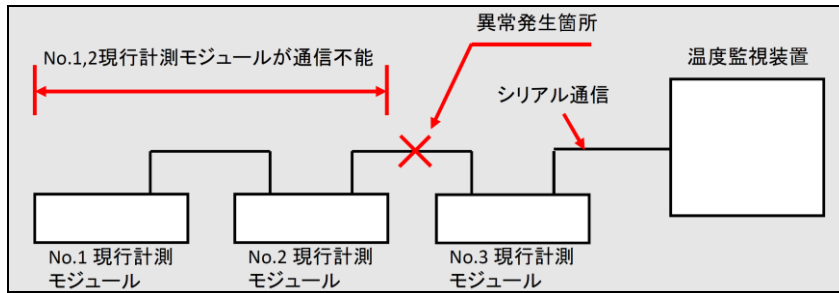


図 9 5. 現行計測モジュールの通信方式

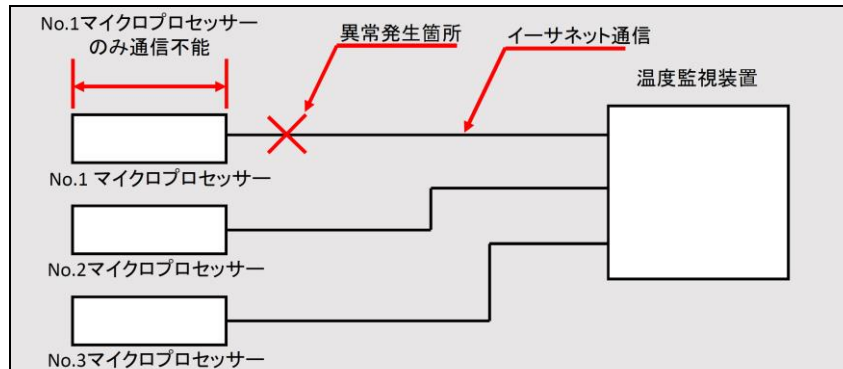


図 9 6. マイクロプロセッサの通信方式

2) 温度監視装置内の通信方式

温度監視装置内の通信方式は、イーサネット通信の中でも船内情報の統合化に関する規格「IS016425 (船内 LAN 装備指針)」にて推奨されている、ネットワークの冗長性向上に繋がる RSTP (Rapid Spanning Tree Protocol) を採用した。図 9 7 に示すように LAN ケーブルをループ状に接続し、通常①の経路で通信時に異常が発生すると自動的に経路を②に切換え、途切れることのない継続的な温度監視を実現する。

【注記】 RSTP：イーサネット接続をループ状に配線しても通信可能とする方式

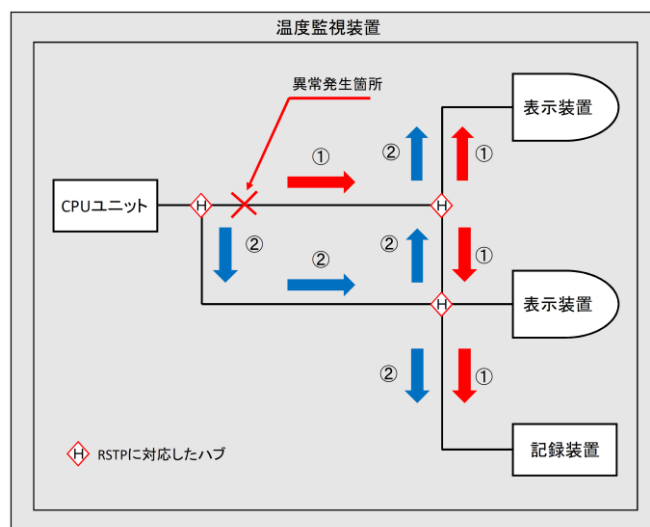


図 9 7. RSTP の概略図

3) 温度計測範囲

温度計測範囲はマイクロプロセッサと同様に $-263^{\circ}\text{C}\sim 100^{\circ}\text{C}$ とした。

4) 温度計測精度

5.5.1 項3) のマイクロプロセッサの高精度計測範囲における精度 $\pm 0.015^{\circ}\text{C}$ に表示値の丸め誤差 0.005°C を含め、温度監視システムの温度計測精度を高精度計測範囲において $\pm 0.02^{\circ}\text{C}$ (-0.02°C , $+0.02^{\circ}\text{C}$ 含む)、その他の汎用精度計測範囲では $\pm 1^{\circ}\text{C}$ とした。

5) 温度センサへの通電回路自動切換え

温度センサの長寿命化を目的として、CPU ユニットにて常用温度センサの断線、短絡による異常を検知した場合に、CPU ユニットからの指令により 5.5.1 項5) にてマイクロプロセッサに搭載した温度センサの切換え回路を作動させ、温度計測を常用温度センサから予備用温度センサに自動で切換える機能を設けた。

6) システムの画面表示値

システムの画面表示値は、温度値表示の他に抵抗値表示を追加した。液体水素の温度計測に必要な精度 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ を鑑みたときに、温度センサの抵抗値表示は長期安定的な計測精度の検証に必要と考え表示することとした。また表示桁数は液体水素運搬船の運用を考慮して温度値を小数点以下2桁とし、抵抗値は小数点以下3桁とした。

7) 記録機能

液体水素の温度変化を記録するために、1秒間隔で温度値と抵抗値をパソコンに蓄積する機能を設けた。蓄積する温度値と抵抗値は、液体水素運搬船の運用において貴重な情報であるため表示値よりも1桁多い詳細なデータを記録可能な仕様とした。

8) 仕様検討のまとめ

上述の1) から7) までの検討結果から、表38に配線システムの仕様を記載する。

表38. 温度監視システムのための配線システムの仕様一覧

項目	仕様	備考
温度計測範囲	$-263^{\circ}\text{C}\sim 100^{\circ}\text{C}$	10K \sim 373K
温度計測精度 ($-255^{\circ}\text{C}\sim -240^{\circ}\text{C}$)	$\pm 0.02^{\circ}\text{C}$	高精度計測範囲
温度計測精度 ($-263^{\circ}\text{C}\sim -255^{\circ}\text{C}$) ($-240^{\circ}\text{C}\sim 100^{\circ}\text{C}$)	$\pm 1^{\circ}\text{C}$	汎用精度計測範囲
画面表示	温度値及び抵抗値	—
記録機能	パソコンに蓄積	1秒間隔
通信方式	イーサネット	RSTP方式

5.6.2 配線システム的设计

5.6.1 項にて検討した仕様をもとに、配線システム的设计を実施した。

1) 外觀及び構成

配線システムの各機器の概要を図9 8から図1 0 4に示す。

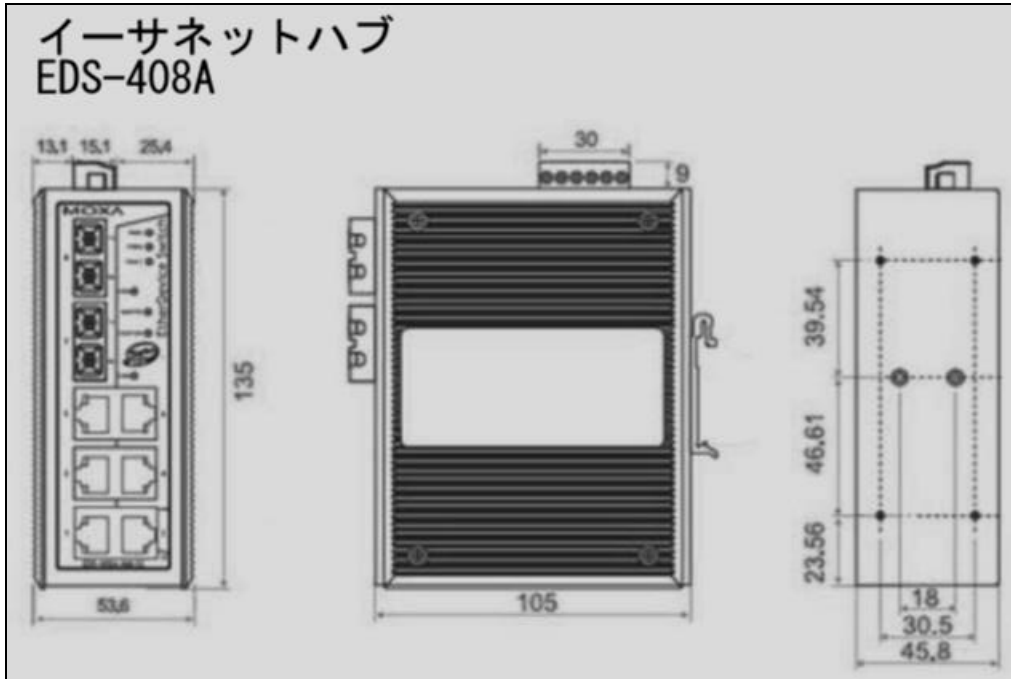


図9 8. イーサネットハブ外形図

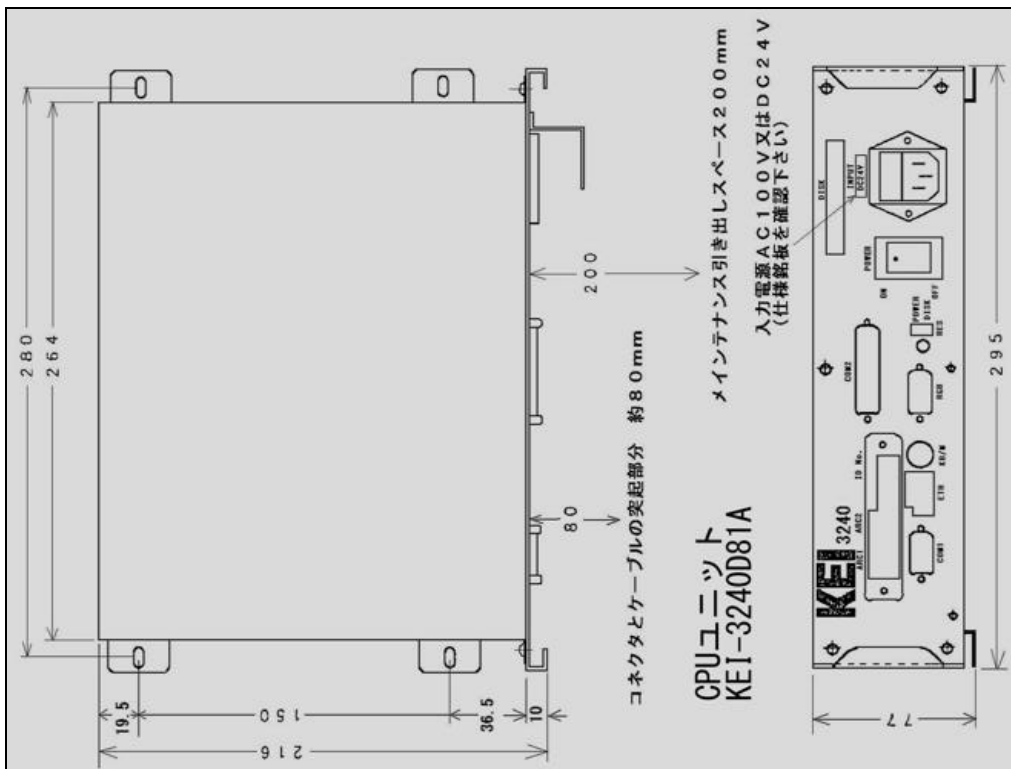


図9 9. CPU ユニット外形図

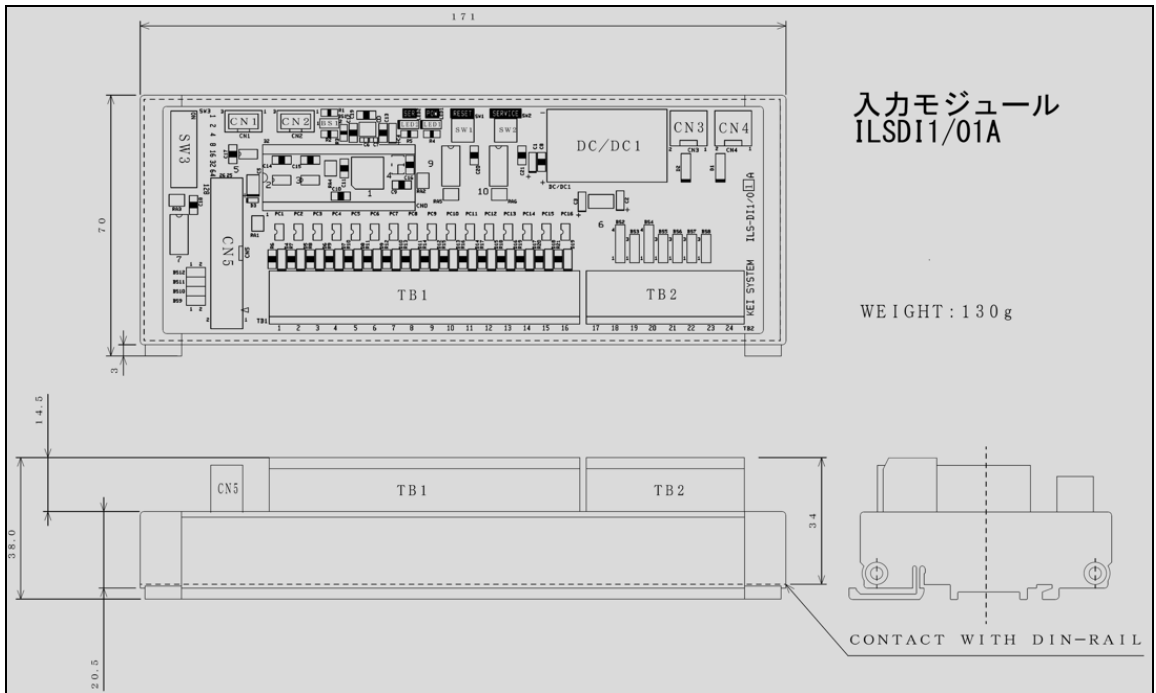


図 1 0 0 . 警報処理用モジュール(入力モジュール)外形図

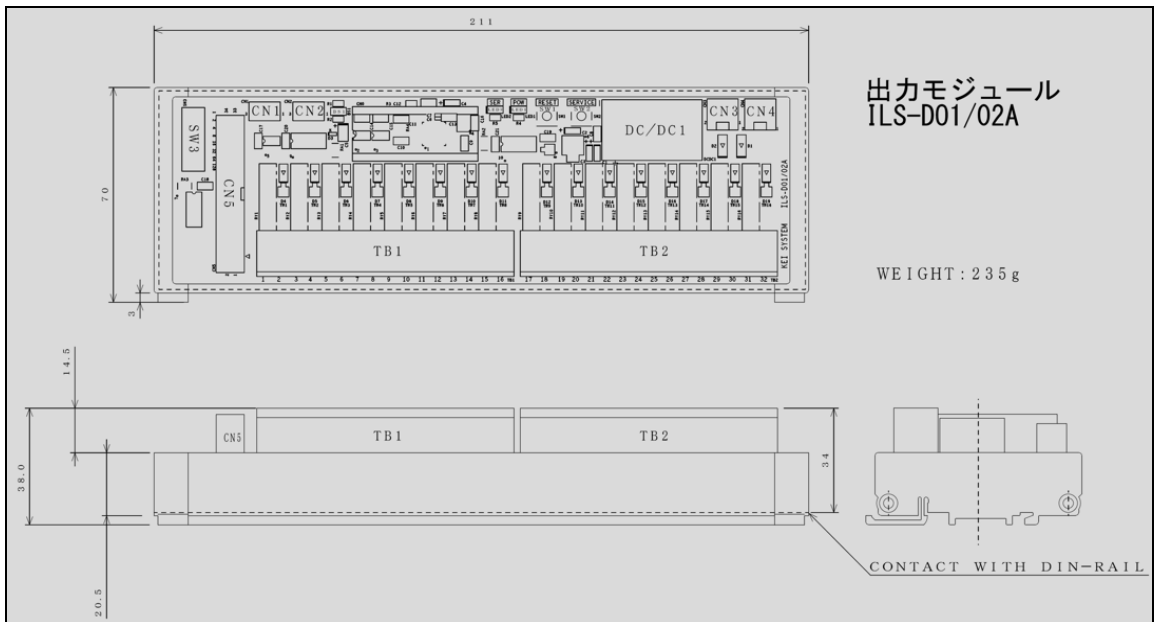


図 1 0 1 . 警報処理用モジュール(出力モジュール)外形図

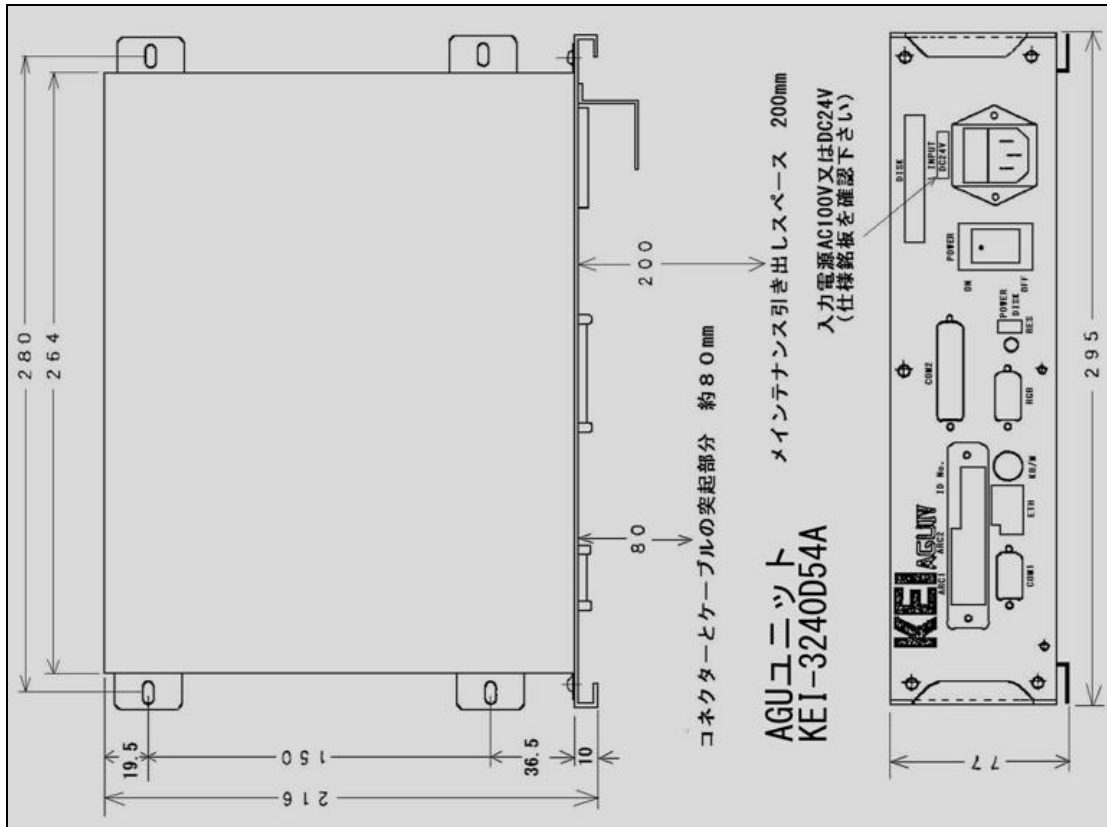


図102. AGUユニット外形図

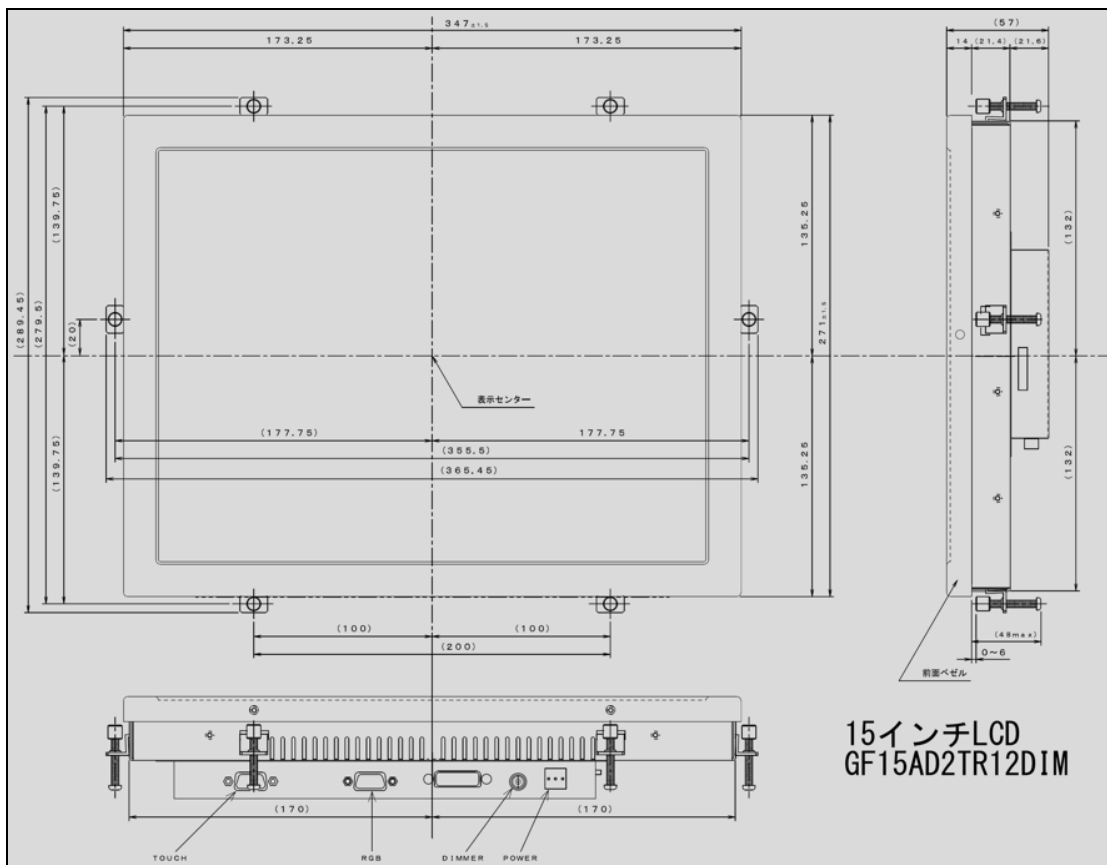


図103. 15インチLCD外形図

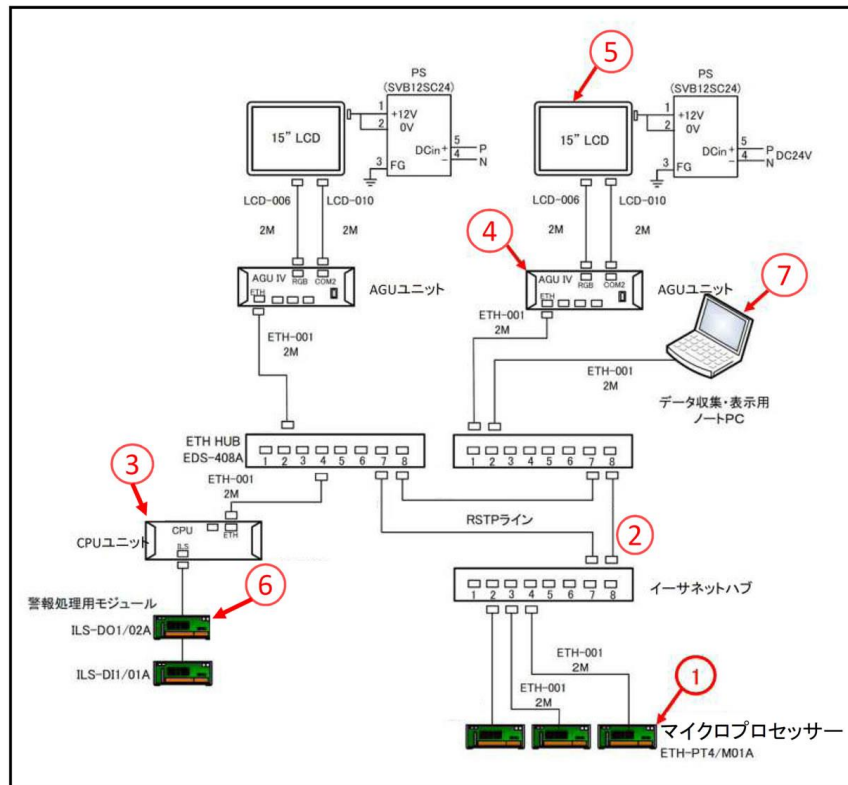


図104. 配線システムのブロック図

2) 配線システムの動作説明

図104内の付番に対応した配線システムの各機器の動作説明を表39に報告する。

表39. 配線システムの各機器の動作説明

No.	機器名称	動作・機能
①	マイクロプロセッサ	温度センサからのアナログ信号をデジタル信号に変換し、CPUユニットに伝送する。
②	イーサネットハブ	システムを構成する各機器をイーサネット通信に接続する。RSTPに対応し冗長化された接続状態を可能にする。
③	CPUユニット	マイクロプロセッサから伝送されたADC値を15インチLCDに表示するための温度値及び抵抗値に換算する。換算した値をAGUユニットに伝送する。
④	AGUユニット	CPUユニットから伝送された信号を15インチLCDに表示可能なデータに変換する。
⑤	15インチLCD(タッチパネル)	AGUユニットから伝送された信号を温度値及び抵抗値として表示する。
⑥	警報処理用モジュール	警報信号の出力及び停止信号の入力を行なう。
⑦	パソコン	CPUユニットから伝送された温度値と抵抗値のデータを1秒間隔で蓄積する。

5.6.3 配線システムの試作

5.6.2 項に報告した設計をもとに配線システムを試作した。試作した配線システムの概要を図105に示す。

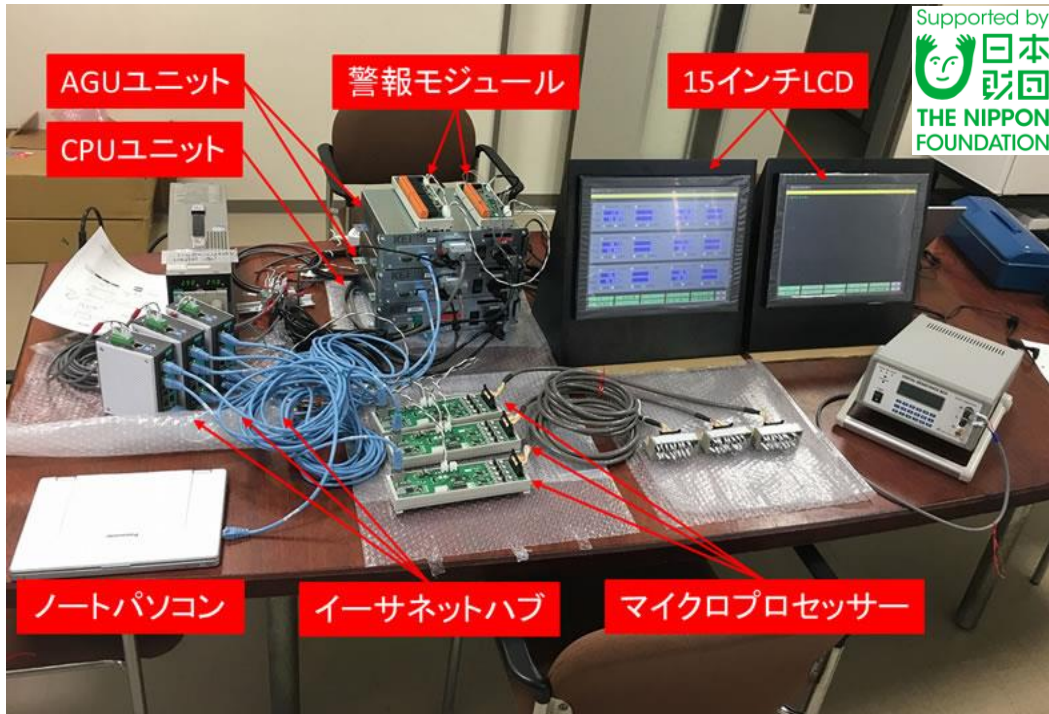


図105. 配線システムの概要

5.6.4 配線システムの機能及び性能評価

5.6.3 項にて試作した温度監視システムのための配線システムを用いた機能及び性能の評価試験を実施したので次に報告する。

1) 温度計測精度の評価試験

試作した配線システムの温度計測精度が、決定した仕様に基づき高精度計測範囲にて $\pm 0.02^{\circ}\text{C}$ 、汎用精度計測範囲にて $\pm 1^{\circ}\text{C}$ であるかを評価した。評価方法を次の①から④に示す。

- ① システムに接続される評価試験用のマイクロプロセッサは1台、試験対象回路は4回路(常用2・予備2)とする。
- ② 図106に示す温度計測精度評価試験の機器構成にて評価試験を実施する。
- ③ 精密可変抵抗器よりマイクロプロセッサに、 $-255^{\circ}\text{C}\sim 100^{\circ}\text{C}$ 相当の抵抗値を入力する。
- ④ 入力した抵抗値から換算した温度値と監視システムの15インチLCDの温度表示値の差から温度計測精度を評価する。

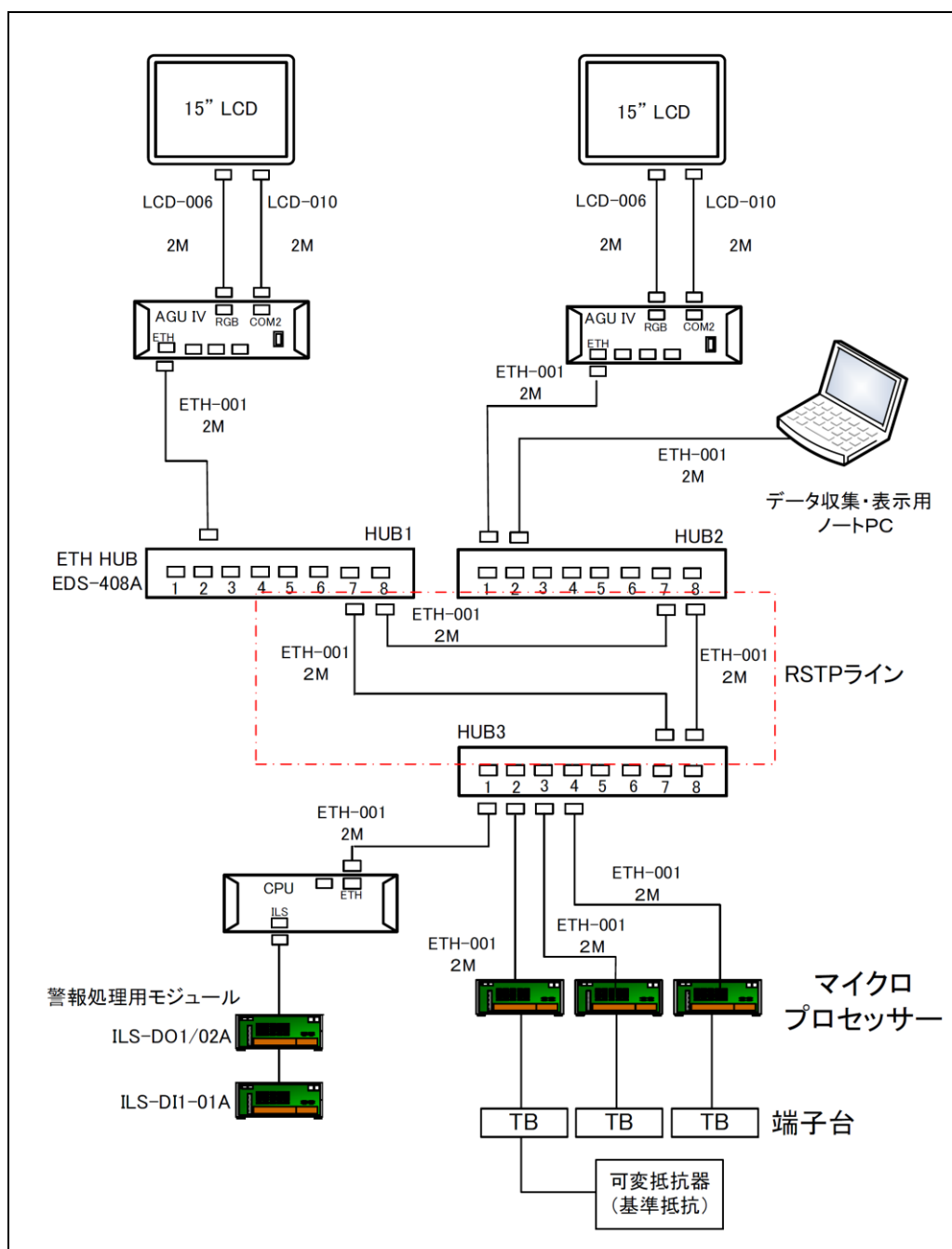


図 1 0 6. 温度計測精度評価試験の機器構成

2) 温度計測精度の評価結果

試作した配線システムの仕様とした温度計測精度(高精度計測範囲において計測精度 $\pm 0.02^{\circ}\text{C}$ 、汎用精度範囲にて計測精度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$)を満足することを実証した。評価時の最大誤差を抜粋して報告した表 4 0 と表 4 1 を示す。

評価結果として、配線システムの高精度計測範囲における最大誤差は -0.01°C 、汎用精度計測範囲における最大誤差は $+0.21^{\circ}\text{C}$ であった。

表 4 0. 配線システムの温度計測精度の評価結果(高精度計測範囲)

計測点	入力温度(°C) ※1	表示温度(K)	換算温度(°C) ※2	温度誤差(°C)
計測点 2 常用回路	-255	18.15	-255.00	0.00
	-253	20.14	-253.01	-0.01
	-243	30.15	-243.00	0.00
	-240	33.15	-240.00	0.00
計測点 2 予備回路	-255	18.15	-255.00	0.00
	-253	20.15	-253.00	0.00
	-243	30.15	-243.00	0.00
	-240	33.15	-240.00	0.00

※1. 入力温度は入力の抵抗値にて液体水素を用いた試験時の基準温度が示したものの

※2. 換算温度は表示温度ケルビンをセルシウス度に換算したものの

(上記※1及び※2は表40と表41に適用する)

表 4 1. 配線システムの温度計測精度の評価結果(汎用精度計測範囲)

計測点	入力温度(°C)	表示温度(K)	換算温度(°C)	温度誤差(°C)
計測点 2 常用回路	-260	13.15	-260.00	0.00
	-256	17.15	-256.00	0.00
	0	273.34	0.19	+0.19
	100	373.36	100.21	+0.21
計測点 2 予備回路	-260	13.15	-260.00	0.00
	-256	17.15	-256.00	0.00
	0	273.32	0.17	+0.17
	100	373.35	100.20	+0.20

3) ネットワーク冗長性の評価試験

試作した配線システムのネットワークの冗長性確認として、RSTP ラインの評価を実施した。評価方法は図 1 0 7 に示す RSTP ラインを構成するイーサネットハブ(HUB1~3)に接続の LAN ケーブルを順番に外し、システムの表示値が継続するかを確認する。

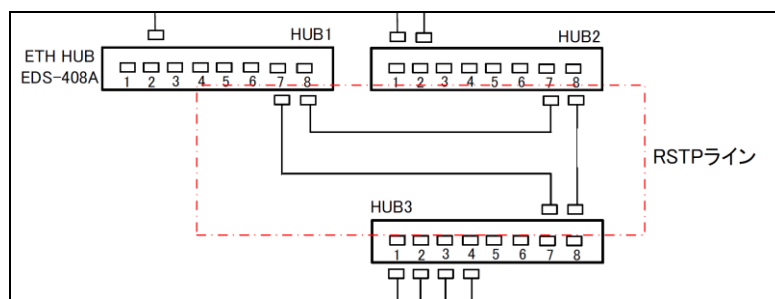


図 1 0 7. RSTP ラインを構成するイーサネットハブ

4) ネットワーク冗長性の評価結果

試作の配線システムの RSTP ラインが正常に機能し、計測値の表示が継続することを確認した。表 4 2 に配線システムのネットワーク冗長性評価の結果を示す。

表 4 2. 配線システムのネットワーク冗長性の評価結果

通信を遮断する区間	判定
HUB1 から HUB2 間	良
HUB1 から HUB3 間	良
HUB2 から HUB3 間	良

5) 温度センサへの通電回路自動切換えの評価試験

試作した配線システムにおいて、温度センサへの通電回路自動切換え機能が正常に動作するか評価した。評価方法を次の①から④に示す。

- ① 試験対象回路は 4 回路(常用 2・予備 2)とする。
- ② 常用回路にダイヤル可変抵抗器を接続し、予備回路に固定抵抗を接続する。
- ③ 常用回路に接続した配線を外して常用回路を断線状態にする。(図 1 0 8 参照)
- ④ システムの表示値が、常用回路から予備回路に切換わることを確認する。

※常用回路を短絡した場合についても通電回路自動切換え機能が正常に動作するか確認する。

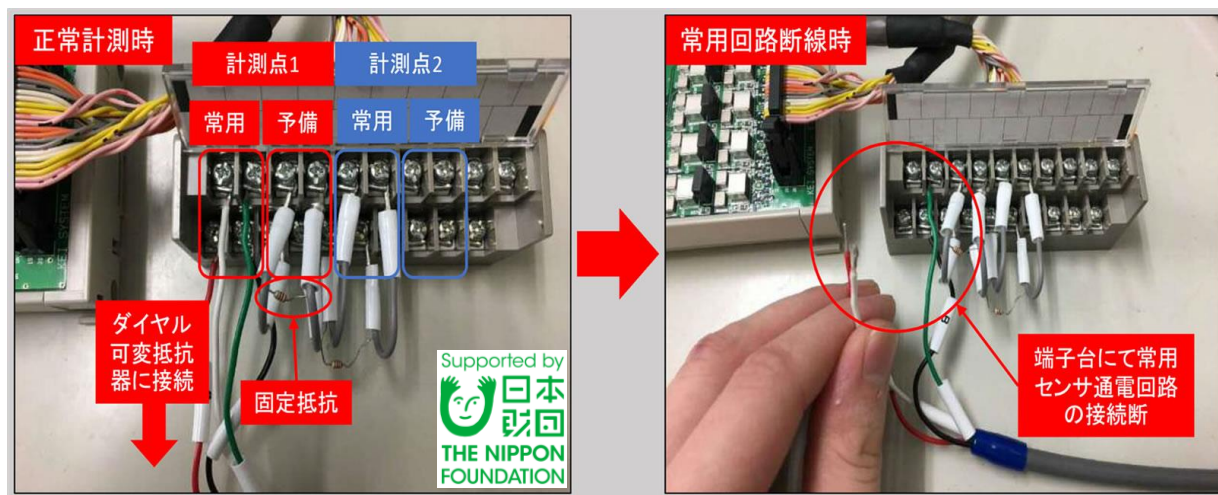


図 1 0 8. 計測回路の自動切換え試験 (断線時)

6) 温度センサへの通電回路自動切換えの評価結果

配線システムにおいて、機器が異常を検知したときに常用温度センサから予備用温度センサに切り、通電回路自動切換え機能が正常に動作することを確認した。評価結果として、図 1 0 9 に計測点 1 を断線状態とした時の表示画面を報告する。

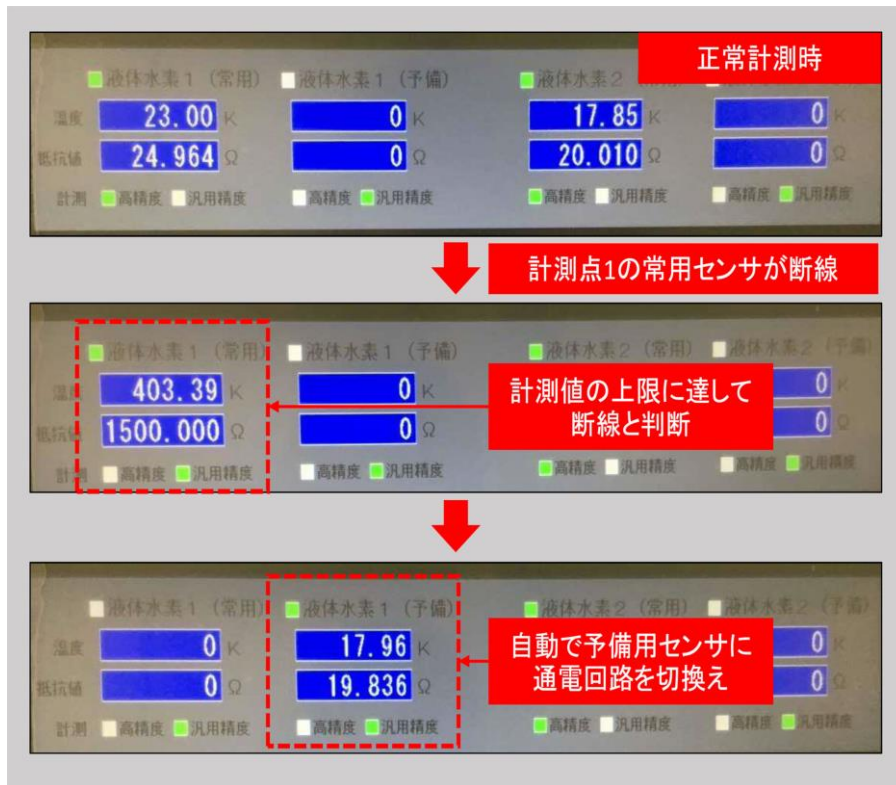


図 1 0 9. 計測点 1 断線時の計測表示画面

7) 電線重量における試算

図 1 1 0 及び表 4 3 に総配線長さを 65m、温度センサの本数を 32 本と仮定した電線重量の試算条件及び結果を示す。試作したマイクロプロセッサを構成する温度監視システムを用いることにより、船用電線で配線する従来の方式から通信用電線で配線する RSTP が採用でき、結果として電線重量の 20.7%の削減が見込める。

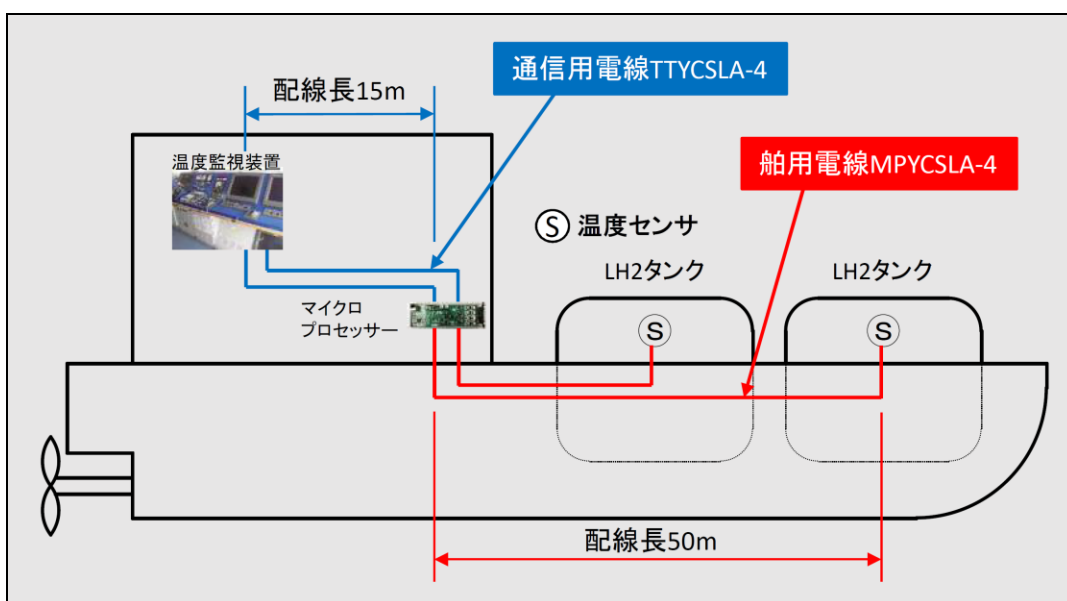


図 1 1 0. マイクロプロセッサを構成する温度監視システムの配線仮定図

表 4 3. 電線重量の試算条件及び結果

項目	従来 방식	本事業の開発品 RSTP 採用	備考
総配線長さ	65m	65m	図 1 1 0 参照
舶用電線 MPYCSLA-4 (210g/m) の適用長さ	65m	50m	図 1 1 0 参照
舶用電線 TTYCSLA-4 (335g/m) の適用長さ	0m	15m	図 1 1 0 参照
温度センサ本数	32 本	32 本	—
舶用電線 MPYCSLA-4 の必要な本数	32 本	32 本	図 1 1 0 参照
舶用電線 TTYCSLA-4 の必要な本数	0 本	2 本	RSTP の採用により電線 が 2 本に削減
電線重量	436. 8kg	346. 05kg	削減量約 100kg
電線重量の削減率	—	20. 7%	従来方式を基準に算出

8) 配線システムの評価まとめ

マイクロプロセッサを含む配線システムの評価により、温度センサの長寿命化やネットワークの冗長性の実現、高精度な温度計測を可能とする舶用液体水素用温度監視システムのための配線システムの開発を実施完了した。評価の要旨を下記に列挙する。

- ・温度計測精度の評価結果より設計段階で決定した精度を満足した。また、舶用の実装環境に近い状態の評価や EMC 試験においても、温度計測精度 $\pm 0.015^{\circ}\text{C}$ を満足した。
- ・システムが異常を検知したときに常用温度センサから予備用温度センサに切り換え、通電回路自動切り換え機能が正常に動作することを確認し、ネットワークの冗長性を確保した。
- ・試算により、マイクロプロセッサを構成する温度監視システムを用いることで、舶用電線から通信用電線への置き換えにより大幅な電線重量の削減が期待できる。電線重量の削減は船体の推進抵抗の削減に繋がり、結果として船舶の省エネルギー化に寄与する。

5.7 舶用液体水素用温度監視システムとしての最終評価

これまで温度センサや配線システムの単体における温度計測精度に関する種々の評価をしてきた結果、各々の機器において液体水素の監視に必要なと考えた温度計測精度 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ に相応しい評価値を得てきた。但し、配線システムについては、温度センサを含めない評価条件であるため正確には「システム機器単体」での評価と位置付けられる。

液体水素運搬船が本来のシステム「温度監視システム」に求める主たる機能及び性能は、必要とされる計測精度を確保し、且つその温度値を正確に表示することであり、機器単体の精度とは異なる。この要求に対し、温度センサの抵抗計測から温度監視システムによる温度値表示に至るまで、一連のプロセス全てにおいて計測精度を保障しなければならない。

従って、本開発事業では船用液体水素用温度監視システムの最終評価として、試作した温度センサと配線システムを組み合わせた合算の温度計測精度が、液体水素の監視に必要と判断した温度計測精度 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ を満たすか検証した。

5.7.1 温度センサと配線システムの組み合わせによる計測精度の評価

1) 温度センサと配線システムにおける組み合わせ誤差の検討

温度監視システムは大別して温度センサと配線システムで構成され各々が誤差を有している。図 1 1 1 に誤差の概要図を示すが、温度監視システムとして最終的な評価をする際に、プラスマイナスの方向を加味した誤差と、方向を加味しない誤差が存在する。

液体水素は蒸気圧が温度変化に対して極めて大きな影響を受けるために、液体水素の監視に必要と考える温度計測精度を $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ と判断したことから、温度センサと配線システムの組み合わせによる計測精度の評価(温度監視システムとしての最終評価)では、方向を加味しない各機器の誤差にて評価・判定することが必要と判断した。



図 1 1 1 . 各機器単体の誤差と組み合わせ誤差の概要

2) 評価に用いる機器の妥当性検証

測温抵抗体を利用した温度計測は抵抗計測と置き換えることができ、本開発事業では、温度センサと配線システムの評価値は標準室レベルの抵抗計測器より得ている。温度センサと配線システムの組み合わせの計測精度の評価は、これまで用いてきた抵抗計測器の計測結果と温度監視システムとした時の比較で行うため、評価に用いる2種類の機器(抵抗計測器と配線システム)の計測精度の妥当性を検証することとした。

トレーサビリティの取れた精密可変抵抗器による検証結果を表4-4に示すが、どちらも誤差や偏差が小さく抵抗計測器と配線システムの計測精度は比較評価に用いる機器として妥当と判断した。なお、精密可変抵抗器の抵抗値を更に上位機種(抵抗計測器(抵抗精度 5ppm))で評価し、出力する抵抗値の正確性や再現性があることを検証済みである。

表 4-4. 抵抗計測器と配線システムの計測精度の妥当性検証(抵抗計測)

項目	抵抗計測器	配線システム		
		計測回路A	計測回路B	計測回路C
計測誤差※	-0.0004 Ω	0.0015 Ω	-0.0020 Ω	0.0040
標準偏差	0.0002	0.0001	0.0001	0.0001

※計測誤差は精密可変抵抗器が出力する抵抗値と機器の計測値の差

3) 温度センサと配線システムの組み合わせによる計測精度の評価結果

実際に液体水素を用いた温度センサと配線システムの組み合わせによる計測精度の評価結果を図1-1-2及び表4-5、温度監視システムによる温度値表示の一例(液体水素の温度計測)を図1-1-3に示す。

上述の表4-4に報告した標準室レベルの抵抗計測器の計測値より評価すると、温度監視システムとした計測区間と抵抗計測器の区間では、同一試料の温度差が最大で0.017℃(図1-1-2内の緑色線②液面ポジションセンサが該当)であった。これを配線システム単体としての誤差と置き換え、更に方向を加味しない各機器の誤差の和で評価した場合においても温度センサと配線システムの組み合わせ、即ち船用液体水素用温度監視システムとしての計測精度が±0.05℃を実現できており、本開発事業における全ての評価を実施完了とした。

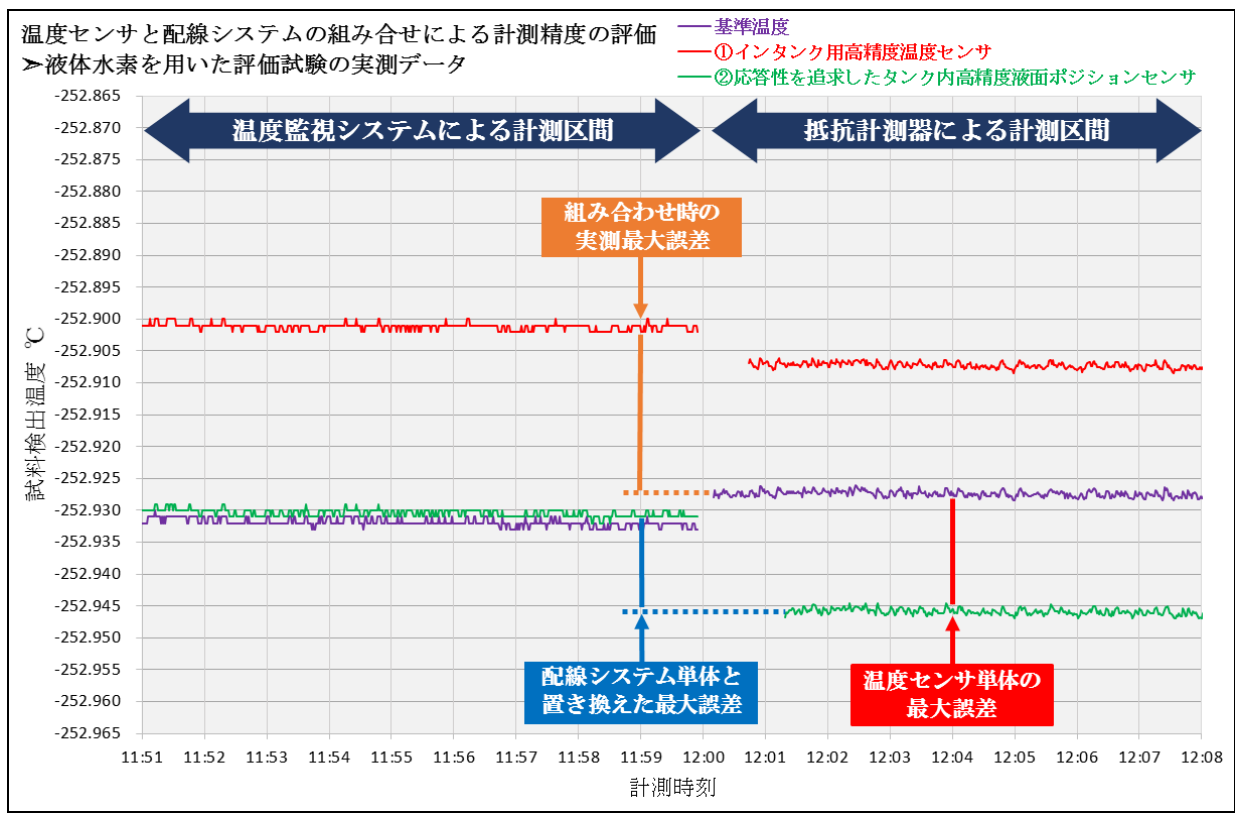


図 1 1 2. 温度センサと配線システムの組み合わせによる計測精度の評価データ

表 4 5. 温度センサと配線システムの組み合わせによる計測精度の評価結果

No.	評価内容	インタンク用高精度 温度センサ	応答性を追求した高精度 液面ポジションセンサ
1	温度センサ単体の誤差量 (基準との比較法)	(+)0.021°C	(-)0.021°C
2	配線システム単体と置き換えた 誤差量(抵抗計測器からの温度差)	(+)0.005°C	(+)0.017°C
3	温度監視システムとしての誤差 (No. 1 と No. 2 の和)	0.026°C	0.038°C
4	組み合わせ時の実測の誤差 (方向を加味した見掛け上の誤差)	+0.026°C	-0.004°C



図 1 1 3. 温度監視システムによる温度値表示の一例(液体水素の温度計測)

5.7.2 船用液体水素用温度監視システムにおける結論

配線システム単体から、温度センサとシステムの組み合わせ「温度監視システム」に計測条件を変えた時、機器単体の誤差の和で想定した温度値から一様でないプラス方向の差(最大約 0.01℃)が生じた。計測回路毎に異なる電流のばらつき起因の自己加熱による影響を受けた読取り誤差や、温度センサとシステムを接続する端子間の接触抵抗等、組み合わせによって加算される誤差の要因が複数あるものと判断し、温度監視システムとして高い温度計測精度±0.05℃を実現するためには、温度センサとシステムを組み合わせた評価の重要性を認識した。

本開発事業で試作した温度センサと配線システムはそれぞれを組み合わせた状態においても、液体水素の監視に必要と考えた温度計測精度±0.05℃を十分に実現できることを-253℃の超低温領域で実証した。

結論として、液体水素運搬船が担う水素の安定供給により実現される CO2 フリーの水素社会に資する船用液体水素用温度センサ及び温度監視システムの技術開発に成功した。

6. 平成 28 年度の目標達成状況

1) 目標の達成状況

2.1 項の①から③に示した本事業の最終目標の達成状況は計画に対して 100%となった。

目標の①については、液体水素用温度センサの装備場所と用途を検討した結果、「インタンク用高精度温度センサ」、「応答性を追求したタンク内高精度液面ポジションセンサ」、「タンク内各部のモニター用温度センサ」、「船内多用途に対応する温度センサ(溶接可能)」、「表面温度計測用センサ(ブロック形状)」の 5 種類とし、各センサの設計と試作を行い-253℃の超低温における性能評価を実施したところ、高精度を求め開発した 3 種類の温度計において最大でも±0.05℃の誤差内で計測可能な船用液体水素用の温度センサを開発することができ、目標を達成することができた。

目標の②については、液体水素用温度センサの長寿命化を目的とした、温度センサ素子への電流制御及び通電回路の自動切換機能を備えたマイクロプロセッサを開発し動作試験を行ったところ、計画通りに動作することを確認することができ、目標を達成することができた。

目標の③については、デジタル信号変換回路とノイズ対策を施したマイクロプロセッサを開発し、これを用いた温度監視システムの動作試験を行ったところ、計画通りに動作することが確認できた。従ってネットワークの冗長性向上と船用電線から信号ケーブルに置き換えることが可能になり、目標を達成することができた。

2) 平成28年度の実施内容の要旨

① 実用化に供する船用液体水素用温度センサの設計及び試作

- ・ 装備場所や用途に必要とされる温度センサの形状及び性能を検討して、5種類の実用化に供する船用液体水素用温度センサの設計及び試作を実施完了した。
- ・ 液体水素を用いた評価試験にて、温度センサに求める諸性能「高精度 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ 」「気液境界面の検知」「 -253°C における表面温度計測(疑似的評価による)」が十分に確保されていることを実証した。
- ・ 設計及び試作した実用化に供する船用液体水素用温度センサには、プロトタイプセンサで得た技術的改善を施し、その成果が個体のばらつきの抑制につながった。

② 船級承認のための試験及び書類作成

- ・ 船級承認に必要とされる試験データ及び書類の作成を実施完了した。
- ・ 船用液体水素用温度センサの船級承認に必要とされる試験を実施し、全ての試験において合格水準に達したことにより開発した液体水素用温度センサが船用として使用可能なことを確認した。

③ マイクロプロセッサの試作

- ・ 船用液体水素用温度センサの長寿命化を目的とした温度センサ素子への通電回路を実現した。
- ・ 船用電線の重量削減を可能とするデジタル信号変換回路を設計した。
- ・ 素子の長寿命化と電線重量の削減を可能とする回路を搭載したマイクロプロセッサの設計及び試作を実施完了した。

④ 温度監視システムのための配線システムの試作

- ・ ネットワークの冗長性を目的として、万一ネットワークの一部が断線することが生じてもセンサからの情報伝送に途切れのない配線システムの設計及び試作を実施完了した。
- ・ 配線システムの動作試験を行い設計段階で求めた機能を満足することを実証するとともに、実装環境を想定した評価及び船級規則に準じた試験にて船用に使用可能であることを確認した。

7. 本技術開発における自己評価

平成27年度から28年度に亘る「船用液体水素用温度センサ及び温度監視システムの技術開発」を自己評価すると、当初の目標を大きく上回る成果を得た。事業目標にはない、温度センサとシステムを組み合わせた合算の温度計測精度 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ の達成は、世界初の液体水素運搬船の要求仕様となり、これを実現可能としたことは本技術開発の大きな成果と評価できる。

8. 船用液体水素用温度計測機器としての今後の取組み

引き続き液体水素を用いた評価試験を行い、日本海事協会の船級承認を取得、機器の構造及び仕様、並びに温度校正などの技術的改善を図り更なる高度化を実現した船用液体水素用温度計測機器の商品化を平成29年度内に目指す。

今後国内で建造される液体水素関連の船舶における液体水素の温度計測に際して、本技術開発の成果を生かし貢献していく。

最後に本開発に関して公益財団法人日本財団からモーターボート競走共益資金による補助金を受けて実施しており、ここに記して厚く感謝申し上げます。

「この報告書は BOAT RACE の交付金による日本財団の助成金を受けて作成しました」

(一社)日本船用工業会

〒105-0001

東京都港区虎ノ門一丁目13番3号(虎ノ門東洋共同ビル)

電話：03-3502-2041 FAX:03-3591-2206

<http://www.jsmea.or.jp>