

JAERI-Tech

98-038



フルオロカーボンによるトロイダル
磁場コイルの冷却

1998年9月

宮田 寛・新井 貴

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問い合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1998

編集兼発行 日本原子力研究所

フルオロカーボンによるトロイダル磁場コイルの冷却

日本原子力研究所那珂研究所核融合装置試験部

宮田 寛*・新井 貴

(1998年8月13日受理)

JT-60 のトロイダル磁場コイル (TFC) において、割れが検出された導体用冷却管に水に代りフルオロカーボンを流すことを検討した。フルオロカーボンであるフロリナート（3Mの登録商標）の特性調査に基づき、沸点以下で使用すれば地球温暖化への影響を無視できることから、TFC導体の使用温度よりも沸点温度が高く、且つ熱容量の比較的大きい「FC-43」を選択した。この「FC-43」を冷媒とした熱解析により、TFCへの冷却効果はかなり期待できることを明らかにした。さらにこの冷媒とTFCの各部及び冷却通路を構成する材料との腐食反応を、JT-60の経年劣化及び短絡等の異常事象をも考慮した条件下で評価し、特に問題のないことを実証した。

以上より、通水不能の冷却管の増加時にはフロリナートによる冷却は JT-60 の運転に有効であることを示した。

那珂研究所：〒311-0193 茨城県那珂郡那珂町向山801-1

*外来研究員：㈱日立製作所

Study on Usage of Fluorocarbon for Toroidal Field Coil Cooling

Hiroshi MIYATA * and Takashi ARAI

Department of Fusion Facility
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received August 13 ,1998)

In JT-60 machine, usage of fluorocarbon as an alternate coolant to a cooling channel of toroidal field coil (TF coil) in which a crack was detected is investigated. Fluorinert (a registered trademark of 3M) liquid which is one of fluorocarbon was reviewed, and liquid "FC-43" was found as an appropriate one for TF coils cooling because of its physical properties about boiling point and thermal capacity. Fortunately, Fluorinert does not have impact on the greenhouse effect for the earth under the temperature of its boiling point. And thermal analysis shows that the cooling effectiveness obtained with liquid "FC-43" for TF coils is rather well. Moreover, corrosion tests were carried out between liquid "FC-43" and materials used in JT-60 by considering deterioration of TF coils. The test results demonstrate that there is no problem in applying liquid "FC-43" as a coolant to cooling channel of TF coils.

Results obtained above conclude that usage of fluorocarbon is one of the effective means to perform further experiments in JT-60.

Keywords : Fluorocarbon, Coolant, Fluorinert, Corrosion, Toroidal Field Coil, JT-60
Machine

* On leave from Hitachi, Ltd.

目 次

1. 緒言.....	1
2. JT-60 トロイダル磁場コイル用冷却管.....	2
3. 水代替の冷却媒体としてのフロリナート.....	5
3.1 TFCのフロリナートによる冷却効果.....	5
3.1.1 TFCの冷却媒体として要求される特性.....	5
3.1.2 フロリナートによる冷却効果.....	6
3.2 フロリナート(Fluorinert)の主要特性.....	9
3.2.1 フロリナートの基本的性質.....	9
3.2.2 フロリナート「FC-43」の特性.....	10
3.2.3 JT-60における照射環境と耐放射線安定性.....	11
4. フロリナート使用における懸念事項の検討.....	13
4.1 フロリナート「FC-43」の環境への影響.....	14
4.1.1 基本組成など.....	14
4.1.2 地球温暖化への影響.....	16
4.1.3 廃棄処理方法など.....	17
4.2 トロイダル磁場コイル構成材料への腐食作用.....	18
4.2.1 TFC導体及び冷却管材料(0.08%銀入り無酸素銅).....	18
4.2.2 TFC用冷却媒体の通路材料(ゴムホース/Oリング).....	27
4.2.3 TFC外枠材料(高マンガン鋼).....	33
4.2.4 TFC導体用の絶縁材料(エポキシ系樹脂).....	37
5. 結言.....	47
謝辞.....	49
参考文献.....	49

Contents

1. Introduction.....	1
2. Cooling Channels of the Toroidal Field Coils in JT-60 Machine.....	2
3. Application of Fluorinert to TF Coils as Coolant Instead of Water.....	5
3.1 Advantages on Cooling of TF Coils with Fluorinert.....	5
3.1.1 Characteristics Required for Coolant of TF Coils.....	5
3.1.2 Analysis of Cooling Effectiveness in TF Coils.....	6
3.2 Typical Characteristics about Fluorinert Liquid.....	9
3.2.1 Physical Properties of Fluorinert Liquid.....	9
3.2.2 Liquid Specifications of Fluorinert "FC-43".....	10
3.2.3 Radiation Stability of Fluorinert "FC-43" in JT-60.....	11
4. Assessment on Fluorinert Application for Cooling of TF Coils.....	13
4.1 Environmental Load Consideration of Fluorinert "FC-43".....	14
4.1.1 Basic Constitutions of Fluorinert "FC-43".....	14
4.1.2 Impact of "FC-43" on the Greenhouse Effect for the Earth.....	16
4.1.3 Practical Method of Disposal of Fluorinert etc.....	17
4.2 Test Results of Compatibility with Materials Used in JT-60.....	18
4.2.1 Oxygen-free Copper for Conductors and Cooling Channels.....	18
4.2.2 Rubber Hose and O-ring Used for a Path of Coolant.....	27
4.2.3 High Manganese Steel As Structural Material of TF Coils Case.....	33
4.2.4 Poly-amid Paper Stacked Sheet and Epoxy Pregrated Glass Used for Insulation Layer.....	37
5. Summary.....	47
Acknowledgement.....	49
References.....	49

1. 緒 言

臨界プラズマ試験装置 (JT-60) では、一部のトロイダル磁場コイル (TFC) の冷却管に割れの発生が認められ、当該冷却管の埋め込まれたターンに関しては電気絶縁の信頼性確保のため、無通水での運転を実施している。しかし、今後さらに不具合箇所が増加し、それらのターンにおいても無通水での運転を余儀なくされる状況に至った場合には、TFC通電時に導体用絶縁層がその許容耐熱温度を超える、あるいは導体温度の冷却時定数が増大し、現実的な運転周期の確保が困難になるなど、JT-60の放電実験の継続に支障を来たすことが懸念される。

このため、運転負荷の制限等によりこれ以上の割れ発生を抑えるとともに、冷却管の割れの補修技術についても検討が進められている。しかし割れの補修が実現できても、次の定検期間まで水漏れを完全に阻止出来るという保証を得られない限りは、当該ターンに通水することは避けねばならないであろう。

そこで、一つの対策⁽¹⁾として水に代わり高い電気絶縁抵抗を有するフルオロカーボン（商品名：フロリナート「Fluorinert」，3 Mの登録商標）⁽²⁾を割れ発生の冷却管に冷媒として使用し、JT-60の実験運転の効率を維持することが考えられる。フロリナートは塩素原子Clを含まずオゾンの破壊には関連しないが、残念ながら地球温暖化には少なからず影響を及ぼす物質である。したがって、そのための配慮が必要なことは言うまでもない。しかしその問題点を差し引いても、JT-60の現状の実験効率の維持には有効な手段であることが熱的な検討により得られており、その意味においてフロリナートを積極的に利用することは意義のあることと考えられる。

さて、このフロリナートを冷媒として使用するに当たり、強度信頼性の確保の点で懸念される事項として、フロリナートの流路を構成する材料との腐食反応がある。すなわち、冷却管材料である銅材や循環ポンプからTFCまでの引廻しに使用されているゴムホースなどの腐食の問題である。また、フロリナートが冷却管の割れ部よりTFC内部に漏洩することを想定すると、導体材料である銅材や各種絶縁材料への影響、TFC外枠材料である高Mn鋼等のフロリナートによる劣化、あるいはSCC (Stress Corrosion Cracking) 感受性が懸念される。特に運転開始後10年以上を経て変化した絶縁材料、高Mn鋼とフロリナートは、水分が介在することによって複雑に反応することが考えられる。

さらに、一部のフロリナートが冷却の不具合やターン間短絡などにより沸点以上の高温に曝される場合を想定すると、腐食性の高い弗化水素（HF）に代表される分解生成物の発生^(2,3)が懸念される。この分解生成物が各材料に如何なる影響を及ぼすかの検討も、TFCの信頼性確保のために重要である。

本報告では、フロリナート特性の調査を初め、JT-60運転に対するフロリナート使用による冷却効果、並びに各種材料への腐食作用などの検討結果を述べる。

2. JT-60 トロイダル磁場コイル用冷却管

JT-60 トロイダル磁場コイル (TFC : Toroidal Field Coil) は、図 1 に示す如く、外径 6 m, 重量約 90 ton のコイルで、全18個がトーラス状に等間隔に配置され、各々に最大電流 52.1kA を通電した場合トーラス中心で約10 Tesla、プラズマ中心において4.5 Tesla の磁場を発生させている。このため、通電時には各々の単位コイルに 2 種類の極めて大きな電磁力が作用している。すなわち、

(1) 一つはTFCの作る磁場によってそれ自身が受けるフープ力と、その磁場分布がトーラス内周側ほど大きいために、コイル全体としてトーラス中心方向に作用する向心力である。フープ電磁力の総和は単位コイル当たり約 15,000 ton にも達し、コイル導体自身及びその外側に設けた補強部材で保持されている。一方、向心力は単位コイル当たり約 6,000 ton 以上にもなり、トーラス中心に設けられた中心ブロックにより支持されている。

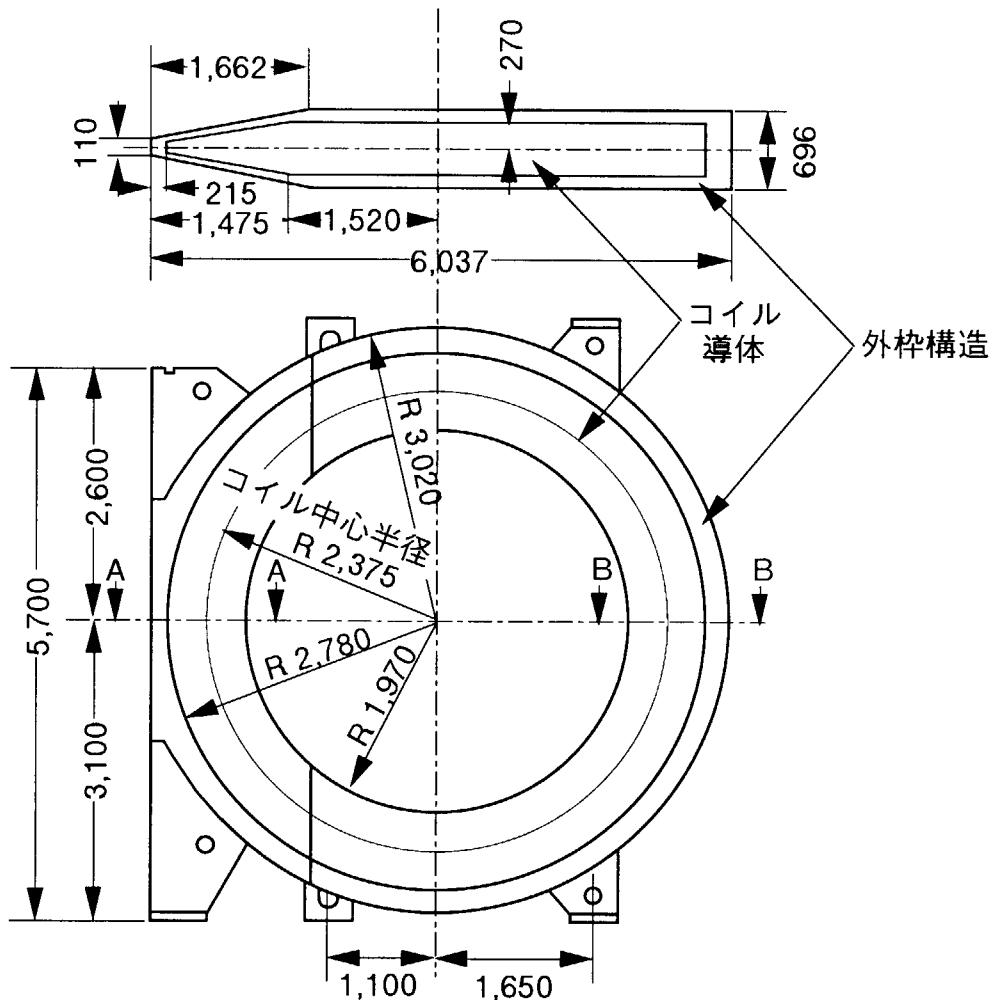


図 1 トロイダル磁場コイルの構造・寸法概略

(2) もう一つは、TFCとポロイダル磁場コイル（プラズマ電流を含む）の相互作用により生じ、TFCをトーラス主半径軸まわりに回転させるように作用する転倒力である。転倒力はトーラス水平面に対し上下逆向きに作用し、その力は単位コイルの上下半分当たり最大約 240 ton にも達する。転倒力の伝達のために、コイルの側面には対地絶縁の保護を兼ねて側板が設けられている。なお、この転倒力はプラズマ不着火時やディスラプション時に最高となる。

このような負荷に対し、複雑な積層構造である TFC 内部（図 2）では導体相互間の辺りや、TFC 外枠構造とコイル導体間の力の伝達などが複雑に働き、さらに通電時には導体の温度上昇に伴い、図 3 に詳細に示すように、導体、冷却管、層間絶縁層、及び対地絶縁層間での熱変形差に伴う応力の発生も考えられる。

さて、コイルの各導体（図 2）には 1 つあるいは 2 つの冷却管が埋め込まれているが、延べ 26,000 ショットに及ぶプラズマ放電実験による上記負荷の繰り返しに伴い、現在トロイダル磁場コイル（TFC）の冷却管の極く一部である TF-14（No.14 TF coil）では 1 つの冷却管、TF-9（No.9 TF coil）では両冷却管に割れ発生が認められている。この割れ発生の原因究明は別途検討⁽⁴⁾ されているが、割れからの冷却水の浸み出しを避けるため、当該冷却管においては無通水での運転を余儀なくされている。

現在、割れが検出された冷却管に関しては、定期検査時にその後の割れの進展状況を観察、同時に他の冷却管に対しては新たな割れ発生の有無の検査を実施し、運転時には無通水冷却管を介して導体の温度を監視している。

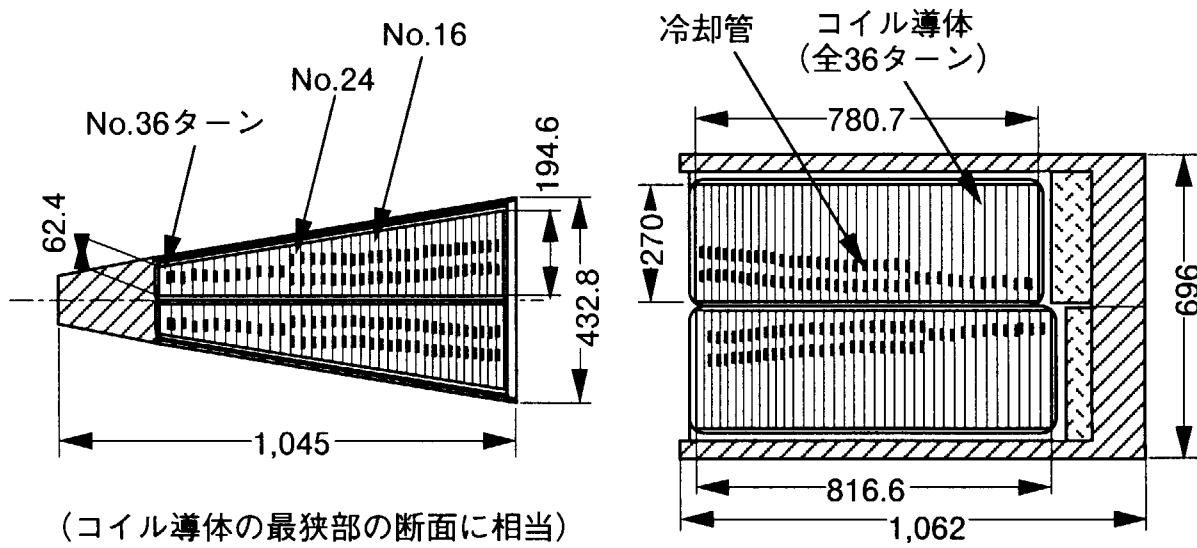


図 1 の A—A 断面

図 1 の B—B 断面

図 2 トロイダル磁場コイルの断面構造

しかし、この割れが検出されている各冷却管の近傍では、これまでに浸み出して回収されていない水分の残存の可能性もあり、導体周囲の絶縁層の劣化をより進行させていることが懸念される。特に図3に示すように、コイル導体と絶縁層の構造から考えて、約10mmが確保されている対地間絶縁層においてではなく、約1 mmと極めて薄い層間絶縁層において第一次的な絶縁破壊の発生、すなわち隣接ターン間の短絡が心配されるところである。

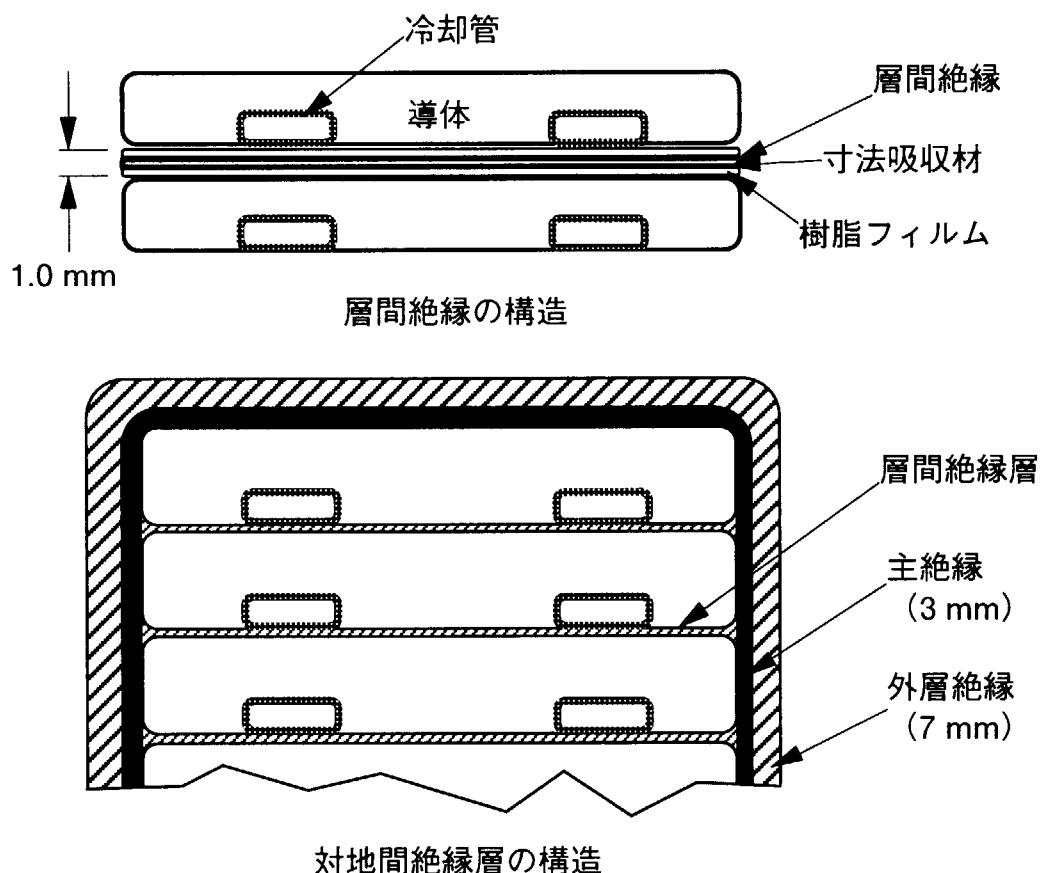


図3 トロイダル磁場コイル断面における絶縁構造

3. 水代替の冷却媒体としてのフロリナート

3.1 TFCのフロリナートによる冷却効果

3.1.1 TFCの冷却媒体として要求される特性

フロリナートにはそれぞれの用途に適うように多くの種類が準備されている。一般にTFCの冷却媒体として要求される特性をフロリナートに当てはめると、下記の特性を有することが望ましい。

電気絶縁抵抗が高く且つ有害物質でない媒体であって、さらに下記の要求に応えるものであること。

沸点…………環境への対策上、気化せず全てが回収可能な冷却システムとする
→ 使用温度で液体であること（沸点が155°C以上であること）

流動点…………室温で十分に流動性を示すこと

→ 0 °Cでも十分流動性のあること（凝固点は-20°C以下であること）

熱的特性……より高い冷却性能が確保できること

→ 热拡散率が高く、出来るだけ熱容量が大きいこと（図4）

流体特性……冷却管内での圧損少なく、冷却管の割れからの漏れが少ないとこと

→ 低粘性で、且つ隙間への流入性の低いこと

構成材料との相性……導体及びその周囲の材料に対し腐食作用の少ないとこと

耐中性子照射特性……使用環境での変質が少ないとこと

→ JT-60における中性子照射量 $\approx 1 \times 10^4$ Rad/year (予測値)

これらの要求特性を考慮して、フロリナートの中で『FC-43』を選択した。

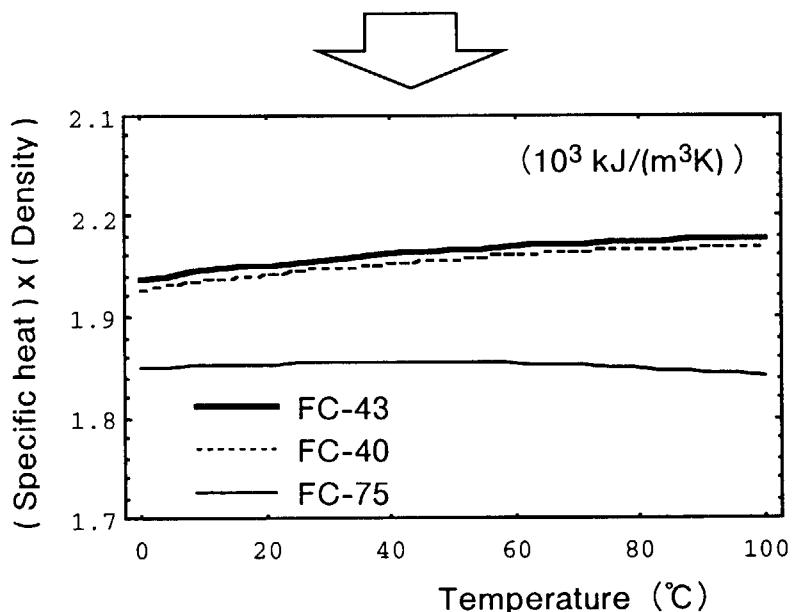


図4 単位容積当りの熱容量（比熱と密度の積）

3.1.2 フロリナートによる冷却効果

(1) 既不具合ターン (15/16ターン) の冷却特性

現在、トロイダル磁場コイル (TFC) の冷却管に割れの発生による冷却水の浸み出しが認められ、TC-14では1つ、TC-9では2つの冷却管とも無通水での運転を実施していることは前述した。そこで、TC-9のNo.16ターンにおいて冷却媒体として水あるいはフロリナートを使用した場合の、コイル導体の冷却特性を比較検討した。その結果を図5に示す。

解析条件：

導体最狭部の断熱温度上昇 = 105.3°C (計算値)

導体の初期温度 = 30°C

冷却媒体の温度 = 30°C

冷却媒体の流速 = 3m/s for Water,

2m/s for Fluorinert

導体の幅寸法 = 18.4mm (No. 15/16ターンを対象とする)

冷却管の流路断面 = 4 x 20 mm

予測熱伝達係数 = 14,500 W/m²K for Water

(乱流) = 952 W/m²K for Fluorinert

コイル導体の最高温度は最狭部(図2参照)に発生し、この最狭部の冷却が冷却特性上問題となる。この部分の温度上昇は、TFCの通電によるジュール発熱量を基に断熱条件の下で算出することができる。解析では、フロリナートの粘性、現状のTFC冷却系統が圧力 8 kgf/cm² で設計されていることを考慮し、フロリナートを流した場合の流速を 2 m/s としている。またReynolds 数 (~7,000) の関係から、フロリナート冷却の管内面での熱伝達係数は乱流時の値を使用した。

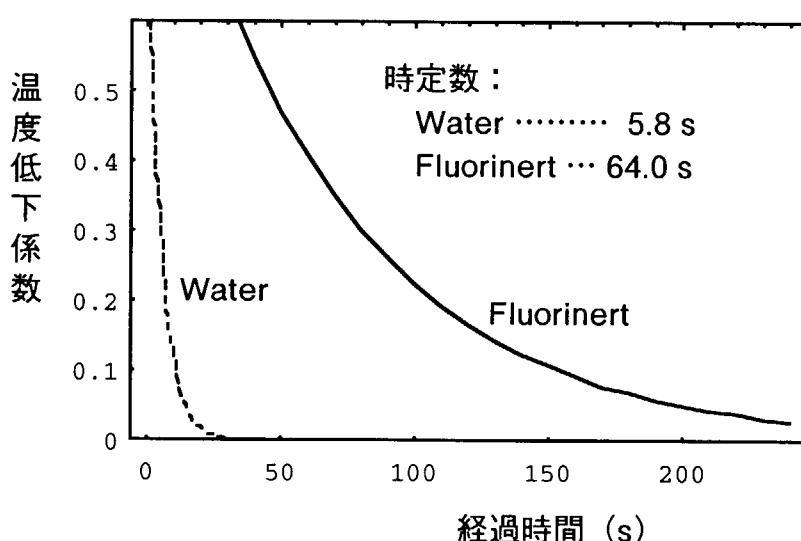


図5 冷却効果と熱時定数の比較

(2) 想定連続 4 ターンにおける冷却効果など

図 6 に示すように、現在無通水のNo.16ターンを中心とした連続 4 ターンが無通水を余儀なくされた場合には、中央のNo.16ターンは無冷却の 1 ターンを介しての冷却となるため、1 ターンのみが無通水の場合に比べ熱時定数は数倍となる。JT-60で現状の実験効率を維持して行くためには、何らかの冷却推進対策が必要となることは明らかである。

図 6 に示す連続 4 ターンを、無通水に代り水あるいはフロリナートにより冷却条件とした場合の解析結果を図 7 に示す。連続 4 ターン（中央は No.17 ターン）にフロリナートを流した場合の熱時定数は 280sec で、水冷却（~60 sec）と比較すると大きいが、無通水の場合（2,040 sec）に比べ大きな効果が認められる。無通水ターンが増加し運転間隔が非現実的になった場合の一つの対策として、有効であることを示している。

導体の形状・寸法の関係から通電によるジュール発熱量が大きく、最狭部の温度上昇の大きい最外周 No.36 ターンに通水不能である場合を想定した解析結果を図 8 に示す。TC-14 の No.24 ターンに比べ冷却の熱時定数もかなり大きくなるばかりでなく、最狭部の温度は 186°C に達し導体用絶縁材料の許容温度（155°C）を超える。したがって、この場合にはこれまで実施して来た 4Tesla の実験運転は実施不可能となるので、水に代わる冷媒として電気絶縁抵抗の高いフロリナートの使用は、不具合ターンの増加時には有効な手段であると言える。

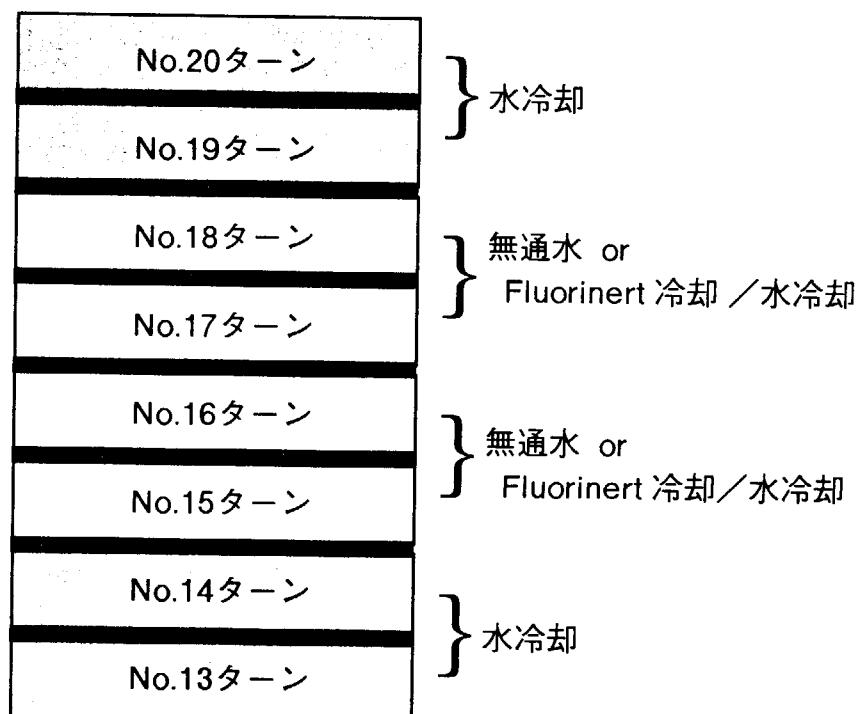


図 6 連続 4 ターンに対する各冷却条件

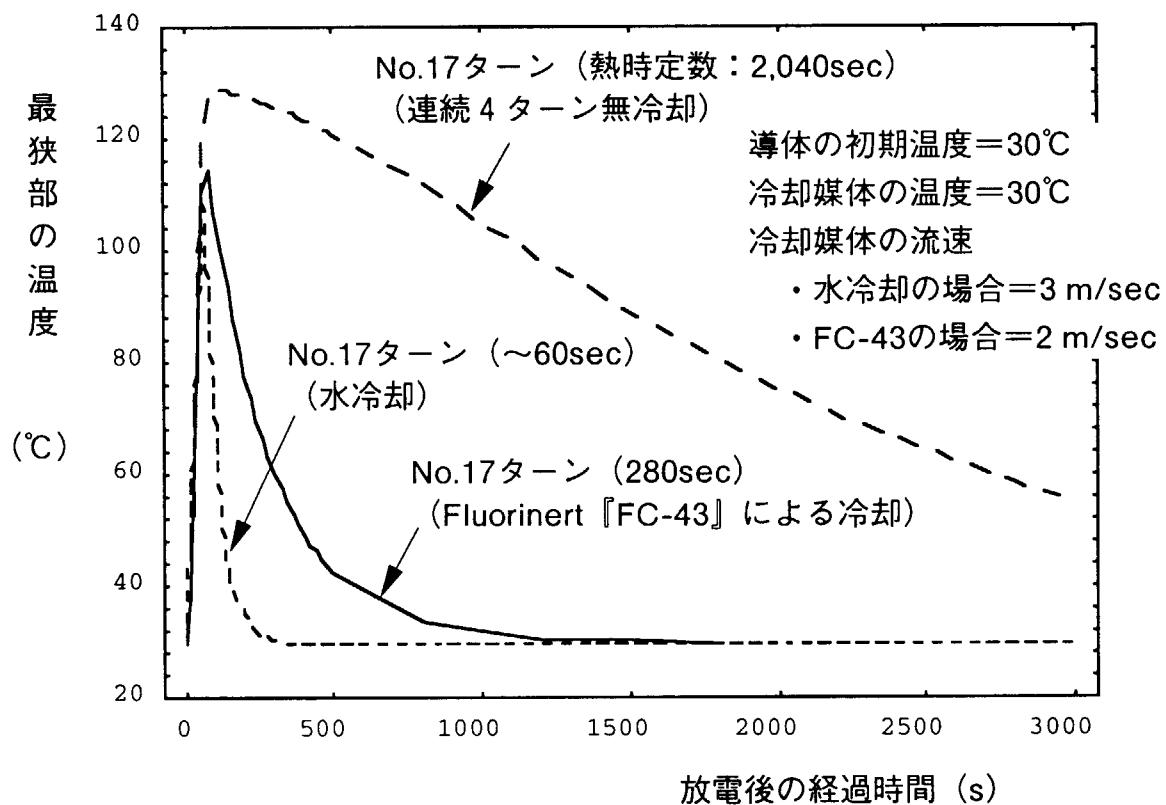


図 7 連續 4 ターン無冷却に対する冷却効果の解析結果

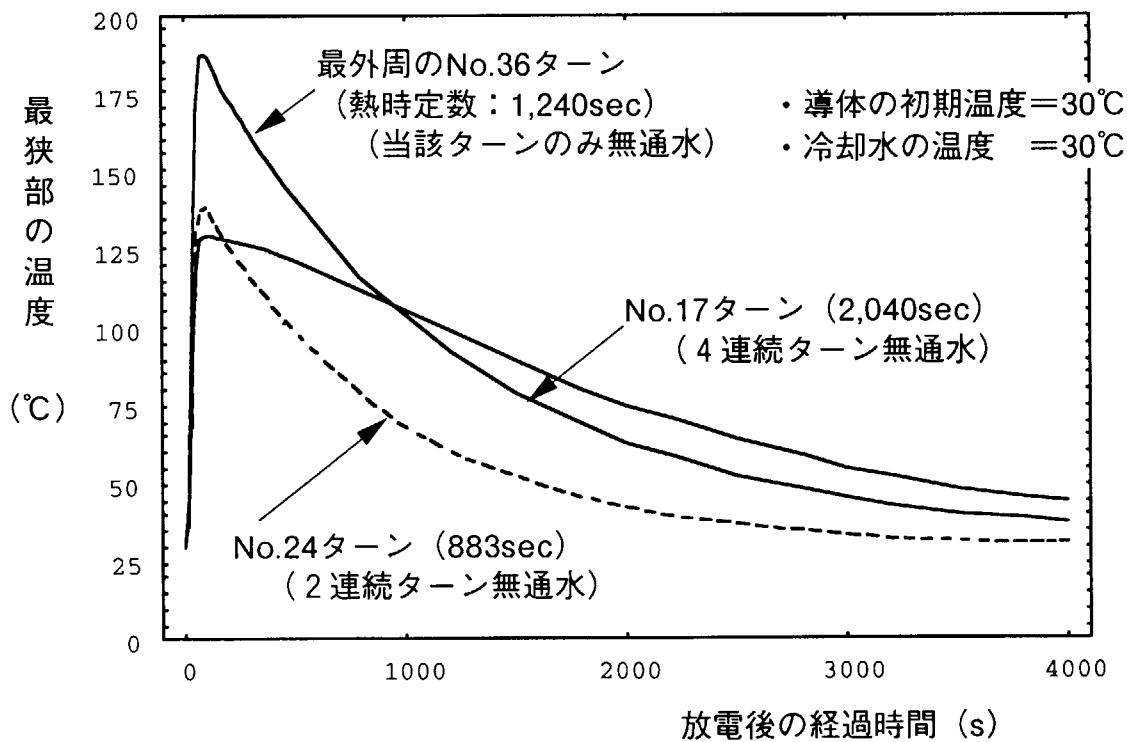


図 8 不具合想定無通水ターンの冷却特性の解析結果

3.2 フロリナート (Fluorinert) の主要特性

3.2.1 フロリナートの基本的性質

- (1) フロリナートの電気抵抗は $\sim 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$ で絶縁性能に優れている。
(水の抵抗値 $\approx 18 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$)
- (2) 密度は水の約2倍で、粘性は水の約4倍である。
(表面張力は水の約1/4でサラサラした液体である)
- (3) 塩素原子Clを含んでいないので、オゾン層破壊には無関係である。
(しかし、地球温暖化係数は高く数千と言われている)
- (4) 沸点の高いものが開発されており、液状での循環利用が可能である。
(JT-60での通電時のTFCの温度上昇に対応できる)
- (5) 冷媒としての熱容量は、水と空気の中間の特性を有している。
- (6) 水分を約10ppm溶解するが、不活性物質であることから腐食性は低い。
(大気中の湿分による腐食と同程度と思われる)
- (7) 無色・無臭で通常は無害である。

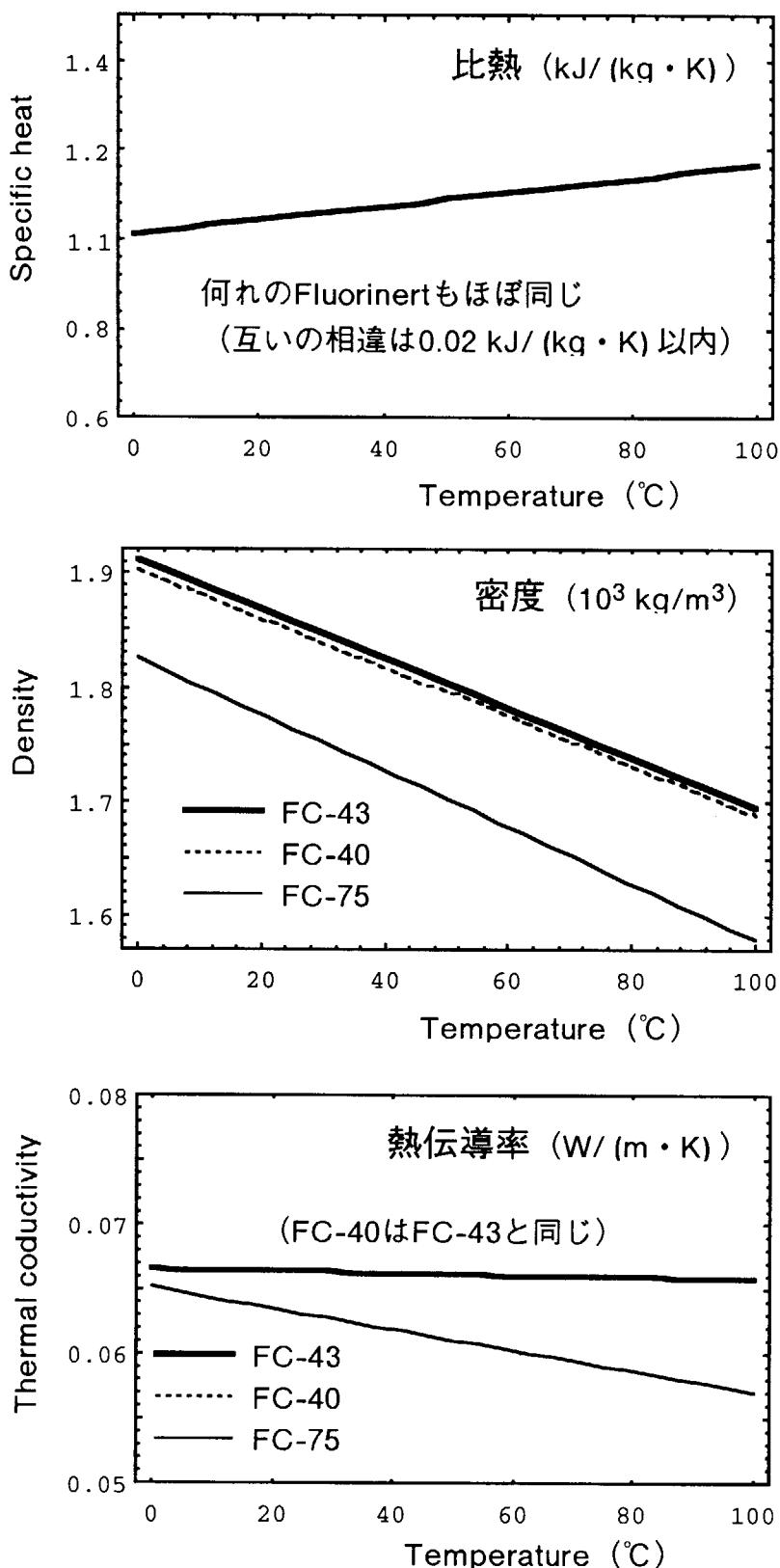
しかし、200°C以上の温度において不純気体との反応により弗化水素や PFIB (パーフロロイソブチレン)などを生成するという報告⁽²⁾がある。これらは有害であり腐食性が高いので、高温での使用を避け且つ不純気体の管理が重要である。循環使用に当っては、水、イオンに対してフィルタによる浄化が必要で、フィルタとしては活性アルミナが有効である。

以上の特性に関連して、参考のためにフロリナート『FC-43』と代表的な他の材料の物性の比較を表1に示す。

表1 25°Cにおける代表的材料の物性の比較

	銅	水	FC-70	FC-43
沸点 (°C)	—	100	215	174
流動点 (°C)	—	0	-25	-50
動粘性率 (m ² /s)	—	0.9 x 10 ⁻⁶	13.4 x 10 ⁻⁶	2.52 x 10 ⁻⁶
絶縁抵抗 (Ω · cm)	—	—	2.3 x 10 ¹⁵	3.4 x 10 ¹⁵
熱伝導 (W/(m · K))	388.9	0.610	0.070	0.065
比熱 (kJ/(kg · K))	0.387	4.19	1.047	1.053
密度 (kg/m ³)	8.93 x 10 ³	1.0 x 10 ³	1.94 x 10 ³	1.86 x 10 ³
比熱 x 密度 (kJ/(m ³ K))	3.46 x 10 ³	4.19 x 10 ³	2.03 x 10 ³	1.96 x 10 ³

3.2.2 フロリナート「FC-43」の特性



「FC-43」を中心として、その特性の温度依存性を図9に示す。FC-43の比熱は温度とともに増大するが、密度は逆に低下するので、熱容量としての温度依存性はほとんどない。また、FC-43は熱伝導率も温度にはほとんど依存せず一定である。

ここには示していないが、動粘性は温度に大きく依存し、25°Cで $2.52 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ であるが、80°Cではその約1/3に低下する。したがって、高温で流動性が低下して冷却性能が落ちる心配はない。

なおFC-43の他の物性値を、参考のため下記に示す。

臨界温度：

$$T_c = 294^\circ\text{C}$$

臨界圧力：

$$P_c = 11.2 \text{ atm}$$

分子量：

$$M = 671 \text{ g/mol}$$

潜熱：

$$Q = 48 \text{ kJ/mol} \\ (\text{at } 174^\circ\text{C})$$

図9 比熱、密度及び熱伝導率の温度依存性

3.2.3 JT-60における照射環境と耐放射線安定性

JT-60の標準使用条件における放射線発生源の強度は、下記の通りである。

(1) 重水素プラズマから発生する中性子

$$\text{年間の最大中性子発生量} = 3 \times 10^{19} \text{ n / 年}$$

(2) NBI 加熱装置から発生する中性子

$$\text{年間の最大中性子発生量} = 1.2 \times 10^{18} \text{ n / 年}$$

これより、TFCの冷却管に循環させたフロリナートに照射される中性子量を概算すると、下記のようになる。

TFCの位置において単位面積当り 5 年間に受ける中性子量 N は、線源を 1 点として球面状に拡がることを仮定すると、以下のようになる。

$$N = 3 \times 10^{19} \text{ n / 年} / A \times 5 \text{ 年}$$

ここに、 A は TFC 位置での球面の面積である。いまフロリナートを冷媒とするコイル導体の代表半径を $R \approx 2 \text{ m}$ とすると、

$$A = 4\pi R^2 \approx 50 \text{ m}^2$$

したがって、単位面積当り受ける中性子量は下記のようになる。

$$N = 3 \times 10^{19} \text{ n / 年} / A \times 5 \text{ 年} \approx 3 \times 10^{18} \text{ n / m}^2$$

なお、発生する中性子のエネルギースペクトルは、

$$2.5 \text{ MeV} \text{ 及び } 14 \text{ MeV} \text{ が } 100 : 1$$

したがって、和の平均値としては凡そ 2.6 MeV である。

JT-60において、中性子照射下でのフロリナートの変質を把握することは重要であるが、残念ながら現在その照射データはない。参考のために、 γ 線照射によるデータを図10, 11に示す。

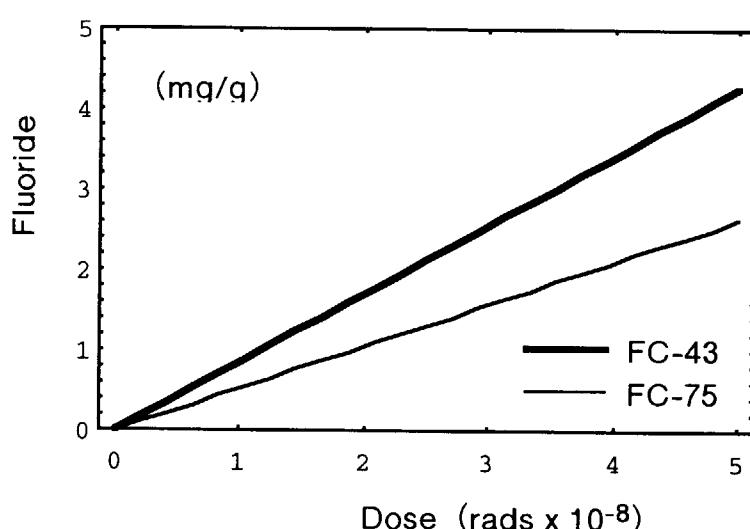


図10 γ 線照射により分解される弗化物の量

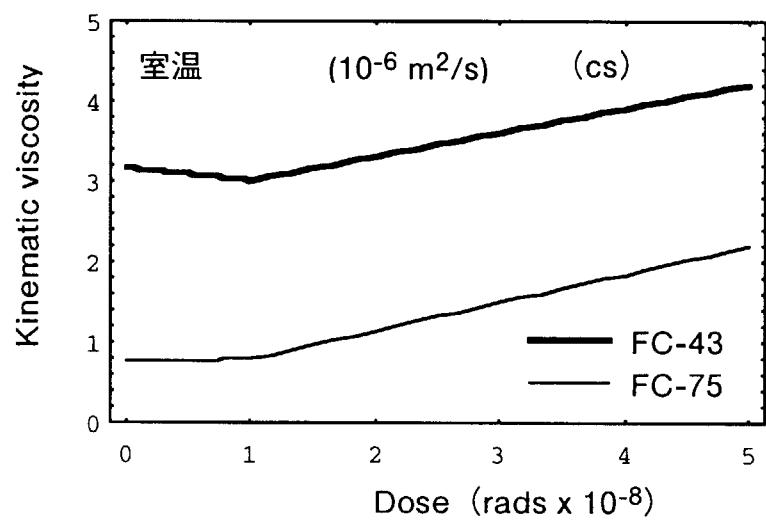


図11 γ 線照射による動粘性の変化

4. フロリナート使用における懸念事項の検討

フロリナートは Cl を含まないのでオゾン層の破壊には関係しない。しかし、温暖化係数は数千のオーダーであり、地球温暖化には少なからず影響を与える。したがって、蒸気状態での大気への放出などは避けねばならない。

さらに、JT-60での使用環境では中性子照射による変質が考えられる。中性子照射による分解生成物に関する検討結果は現在ほとんどない。 γ 線照射により分解される弗化物としては、各種の $CnFm$ と HF が生成することが認められている。

また、フロリナートは室温において不活性物質で、無色・無臭で透明な液体であり、通常の状態では無害であると言われている。しかし、高温に曝されると熱分解し、後述するように、微量であるが PFIB (perfluoroisobutylene) なる有害物質を生成する可能性を有している。特に不純気体の存在がこの反応を促進すると言われており、純度の管理が必要である。さらに PFIB と同時に高温にて微量の弗化水素 (HF) が生成されるが、これらは高い腐食作用を有している。したがって、フロリナートを冷却媒体として使用した場合に、冷却系統を構成する機器のみならず冷却対象であるTFC自体の腐食にも大きく係わることが懸念される。

以上のように、フロリナートの使用に当っては中性子照射による変質、地球温暖化への影響評価、腐食作用の定量的な把握、及び使用後の廃棄方法について検討して置くことが必要である。特に腐食の定量的な検討に際しては、既に水浸み出しを起こしたTFCの状況を考慮した特有の腐食環境を設定することが必要である。すなわち、冷却管の割れから浸み出した水分が既に TFC 内に存在していることを考慮する必要がある。また想定される不測の事態に対し、現象の加速の意味も含めて、より高温での厳しい条件下での評価が望ましい。その上で

- (a) 冷却管、導体については、
 - (i) 電磁力などの負荷の作用下における腐食、
 - (ii) 銅材の冷間加工を考慮した冷却管の腐食及びその皮膜の同定
- (b) TFC冷却系統の通路を形成するゴム、Oリングに対しては、
 - (i) 腐食反応に伴ってフロリナート中に溶出した成分の分析、
 - (ii) パッキンなどの機能上重要な、膨潤性や重量の変化
- (c) 外枠材料である高マンガン鋼に対しては、
 - (i) 電磁力などの負荷の作用下における腐食、
 - (ii) 劣化により白化し脱落した絶縁材料の粉末が混在した状態での腐食作用
- (d) 層間絶縁材料に対しては、
 - (i) 層間短絡など不測事態に生じる高温分解生成物による腐食、
 - (ii) 高温分解生成物と水分による腐食前後における絶縁抵抗値の変化

を評価できる検討が必要である。

4.1 フロリナート「FC-43」の環境への影響

4.1.1 基本組成など

フロリナート「FC-43」の化学構造を図12に示す。明らかに塩素原子 Cl を含んでいないのでオゾン層破壊への問題は基本的でない。（ H を含まないので、いわゆる代替フロンではない）完全に弗素化されたパフルオロカーボンで構成されたものである。

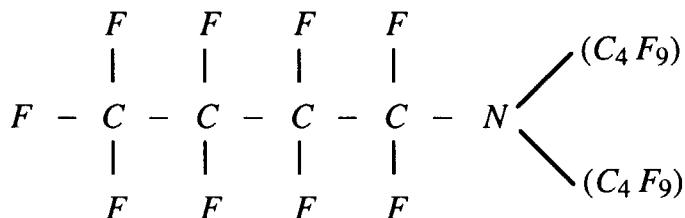


図12 FC-43の化学構造

主成分は上図のような構造であるが、製造工程上炭素数の異なるもの(C_3, C_5 等)も含み得る。また、 C_4F_9 に図13の構造のものが含まれる可能性もある。

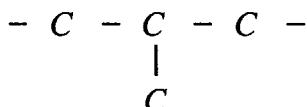


図13 C_4F_9 に含まれる構造

FC-43の化学構造を初め、フロリナートを構成する種々の化学結合エネルギーを表2に示す。 $C-F$ の原子間結合力に由来し、化学的安定性、高伝熱性能、高電気絶縁性、あるいは低分子間力に起因して低表面張力である。したがって全てのフロリナートはイナート（不活性）である。

なお、フルオロカーボン全体（炭素（ C ）と弗素（ F ）からなる化合物）はフロンではなく、「オゾン層を破壊する物質に関するモントリオール議定書」に基づく「特定物質の規制等によるオゾン層保護に関する法律」で規制の対象となる物質ではない。

表2 化学結合エネルギー

結合	結合エネルギー (Cal/mol)	
$C - N$	73	
$C - Cl$	79	フロン……オゾン層破壊に 関与する Cl を含む
$C - O$	86	
$C - F$	116	

さて、大気中におけるFC-43の空気溶解度は容積比で最大26%（図14）で、温度が高い程小さくなる。

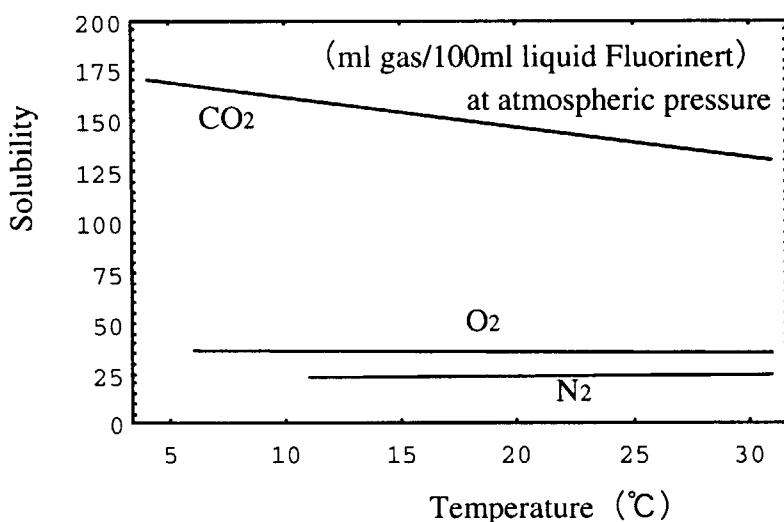
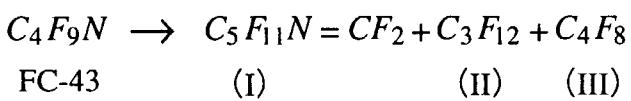


図14 FC-43における主なガスの溶解度

その他の性質としては、25°Cにおいて

- ・ Solubility of water 7 ppm
- ・ Solubility of air 26 ml/100ml
- ・ Critical temperature 303 °C
- ・ Heat of vaporization at boiling point 17 cal/g

このFC-43は熱分解により、通常次式のような反応を示すことが分かっている。



- (I) perfluoroimine
- (II) one of several perfluoroalkanes
- (III) perfluoroalkenes

200°C以上の高温においては、不純気体との反応により弗化水素や PFIB（パーフロロイソブチレン）などが生成する（表3）ことが懸念されている。情報によれば、16時間の熱分解により下記のようなPFIBの発生が報告されている。

0.0006 ppm / hr at 100°C
 0.01 ppm / hr at 160°C
 0.06 ppm / hr at 170°C

表3 FC-43の熱分解生成物（650°C加熱の場合）

<i>Reaction products</i>	<i>Moles of product per 100 moles FC-43 decomposed</i>
<i>Low boiling C₁ and C₂ compounds</i> 19
<i>C₃F₈</i> 19
<i>C₃F₆</i> 34
<i>C₄F₁₀</i> 17
<i>C₄F₈</i> 14
<i>C₅F₁₂</i> 35
<i>C₅F₁₁N (imine)</i> 77
<i>Higher boiling fractions</i> 22

しかし、PFIBの発生条件の詳しいデータの報告はない。さらに、高温における有害な分解生成物としては弗化水素HFがある。報告によれば、

150°C, 1 hr で 0.03 μg/g HF

が発生することが推測される。このHFの発生量を有害な分解生成物に代表させ、これを基に分解生成物による腐食作用を考慮すれば十分と考えられている。

なお、人体に対しては、フロリナートの蒸気を長時間吸入する環境での作業は避けねばならない。（1週40時間の正規の労働時間内での許容濃度：1,000 ppm）、またPFIBの許容濃度（TLV）は0.01 ppmとされている。

4.1.2 地球温暖化への影響

フロリナートの温暖化係数は～数千と言われている。比較的高いが、温暖化の観点からは現在Cの数が6以下は余り問題にされていない。現在CO₂の低減の対象は高温暖化係数（～数万）の物質の削減（例えば、perfluorohydrocarbons）に向けられている。参考のために、地球規模のCO₂排出量の現状は

世界のCO₂排出量（C換算）.....40～50億トン／年

国内のCO₂排出量（C換算）.....2～3億トン／年

である。したがって日本国民1人当たりでは1.67～2.5トン／年である。因みに、自然界で海水に捕捉されているCO₂量は3億トン／年、地中に閉じ込めているCO₂の火山活動に伴う放出量も同じく3億トン／年と予測されている。

温暖化の問題としては（放出量×温暖化係数）の絶対量、すなわち大気の温度上昇への影響が重要と考えられる。試算によれば、不具合のあるTFC1ターンの冷却に要するフロリナート量は、循環させるとして約0.1m³ ($\approx 1.86 \times 10^2$ kg) 必要である。これらが万が一全て蒸気として大気に放出されるとても、それによるCO₂相当量は約600トン（温暖化係数を3,000として）であり、比較的少量と言える。

4.1.3 廃棄処理方法など

(1) 分解生成物の除去法

フロリナートの劣化により発生した分解生成物の除去は、アルミナフィルターにより可能である。水分を多量に含む場合にはフィルターの劣化が速いので二層分離を、少量の場合には脱水剤による分離が有効である。このフィルターにより、HF等も分離できる。

発生した不純気体の除去法の一つとしては、フロリナートを水と混合し不純気体を水に溶解させて、その後水とフロリナートを分離する方法がある。

(2) 廃棄処理方法

(a) 可燃物と一緒に焼却する方法

フロリナートを可燃物と一緒に焼却する方法である。焼却時に生成する酸化物などのガスの拡散を水のシャワーで防止することが必要である。

(b) 廃棄処理法

フロリナートの廃棄は、通常有機物あるいは油類としての処理が、現在実施されている。

(3) その他の留意事項

取扱い上の留意点として、絶縁系の配管に流すときは静電気への配慮が必要である。テフロンチューブではスパークして孔が開くことがある。

4.2 トロイダル磁場コイル構成材料への腐食作用

フロリナート使用に当たり懸念される事項として、冷却管自体や通水のために使用されているゴムホースの腐食の外に、冷却管の割れから漏洩するフロリナートによる絶縁材料、及び外枠構造材料である高Mn鋼への腐食作用がある。特に高Mn鋼の腐食特性に関しては、JT-60の運転状態に即して応力作用下での腐食現象（応力腐食割れ）として捉え、その環境として最も厳しい条件と考えられる引張り応力作用下での腐食特性を検討する。さらに水分とフロリナートの共存状態などを想定し、基本的には下記に示す浸漬試験を実施した。

一般に腐食現象は温度及び時間が大きく関与する。そこで JT-60の運転状態に即して、温度としては各通路において想定される最高温度を、浸漬時間としては余裕を見て今後予想される約10年間の運転において実施されるであろう通電時間の合計として、3,000hrsの試験を実施する。

次いで、冷却管の不具合部から漏洩したフロリナートが層間短絡などの不測の事象により沸点以上の高温に曝され、弗化水素（HF）に代表される腐食性の高い分解生成物を生じ、それらに導体用絶縁材料が曝される場合の腐食状況を評価する。この腐食現象に対しては、JT-60の現在の運転条件に沿って、温度としては運転時のTFC平均温度及び不測の事象を想定した高温を、浸漬時間としては90秒／ショットとして約10年間の通電時間相当となる1,500hrsの試験とする。

以上を総合して、JT-60の今後の運転期間中における各構成材料のフロリナートによる成分、強度、及び絶縁抵抗などの変化について評価した。各構成材料に関する試験結果を以下に示す。

4.2.1 TFC導体及び冷却管材料（0.08%銀入り無酸素銅）

実機形状の矩形管（外寸法 8mm×24mm, 厚さ2mm）を軸長10mmに切断し、一部は加工のまま（CW材）、残りは冷間加工の影響を除く焼鈍（AN材：Arガス中で570°C, 30min.加熱後、空冷）を施し、試験片とした。

（1）腐食溶出試験

溶出試験としては、試験片を溶液を満たしたパイレックスガラス製容器に浸漬し、3,000hrsの間80°Cに保持した。溶液としては、フロリナートに加え水分の腐食への影響を考慮するため、次の3種の条件

- (a) 水分量未調整（フロリナートのみ。水分約10ppm溶解）
- (b) 水分を100ppmに調整したフロリナート
- (c) 水分を500ppmに調整したフロリナート

を検討した。

フロリナートのみに浸漬した場合、初期の1,000hrsで腐食に伴う重量増加が観察されるが、その後の変化は余り見られない。X線回折によれば、酸化皮膜は酸化第1銅（Cu₂O）であることが確認されている。腐食はその皮膜の成長を伴って進行

しており、長期的な腐食速度は極めて小さいと言える（5,6）。すなわち、酸化皮膜の成長がその後の酸素の供給を遮断するメカニズムが作用しながら、腐食が進行するものと思われる。腐食量は水分含有量が多い程大きいが、外観からは3種の溶液条件において浸漬前後に差は認められない。この皮膜厚さは、フロリナートのみの場合約100Å、500ppmの水分を含有する場合は約300Åである。

一般にフロリナートは水分を約10ppmしか溶解しないが、溶解されている水分が腐食により消費されると、溶解されずにフロリナート表面に膜状に分離していた水分がフロリナート中に溶解されて行くものと思われる。試験前後のフロリナート中の水分濃度の測定結果（表4）によれば、何れの条件においても濃度は約10ppmであり、溶解した水分濃度はFC-43の飽和値に達していることを示している。（参考データ、図15）

表4 フロリナート中の水分濃度
(ppm)

項目	水分未調整	水分100ppm	水分500ppm
試験前	6	10	13
試験後 (3000 hrs)	10	11	8

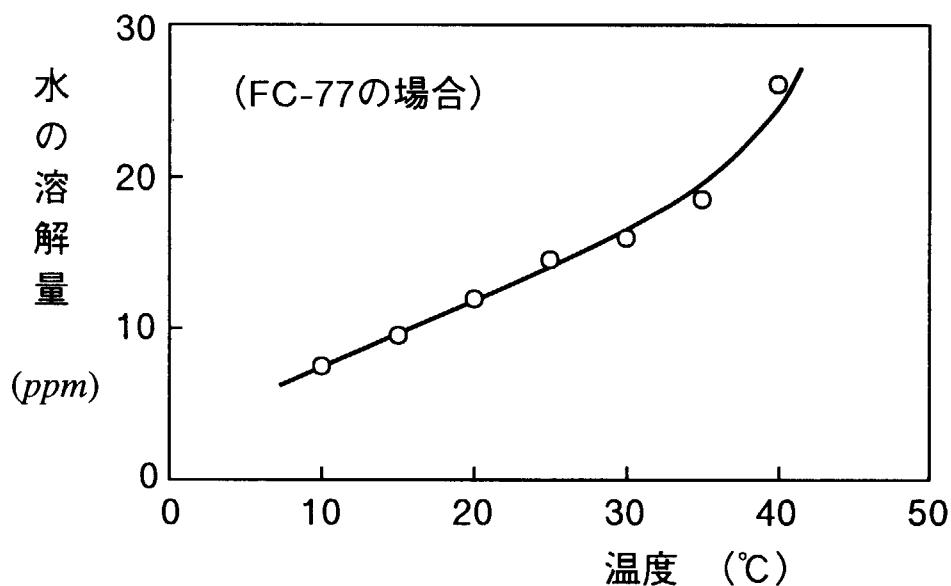


図15 フロリナートに対する水の溶解量

CW材とAN材では腐食量に差は見られず、腐食に冷間加工の影響はない。また、3,000hrs後のフロリナート中の銅イオン (Cu^{2+}) 量は、何れの条件においても検出限界 (0.1ppm) 以下で、腐食溶出量は極めて少ない。

図16⁽⁷⁾によれば、フロリナート中の銅酸化皮膜の腐食速度はアレニウス則に従っている。この結果は、20°C～30°Cの温度上昇が腐食速度を約2倍に加速することを示しているが、実機適用の温度範囲では特に問題となる腐食量とはならないことを示唆している。なお、反応活性化エネルギーは約20kJ/molであり、腐食はフロリナート中の酸素の拡散によって律速されていることが理解される。

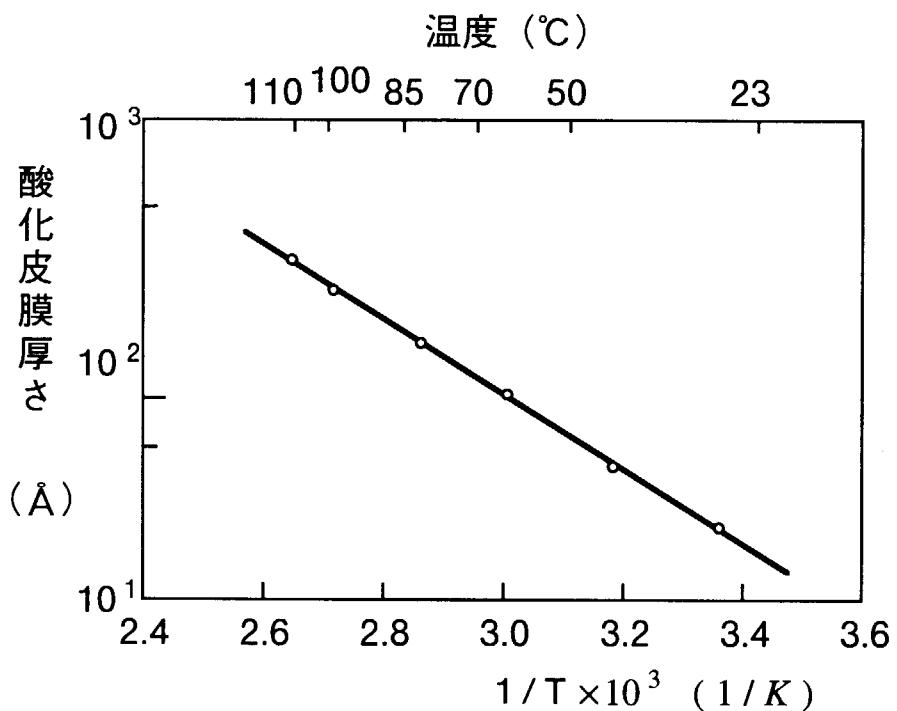
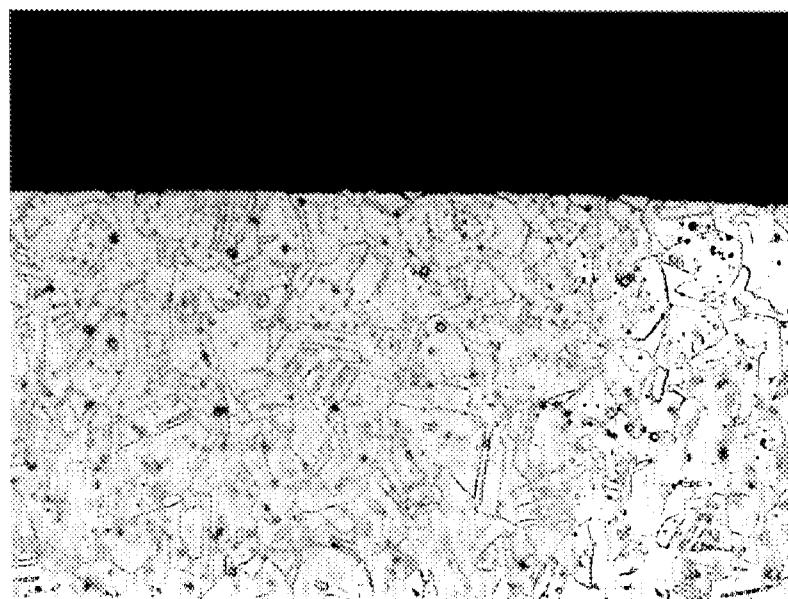


図16 フロリナート中における銅酸化皮膜の成長速度の温度依存性

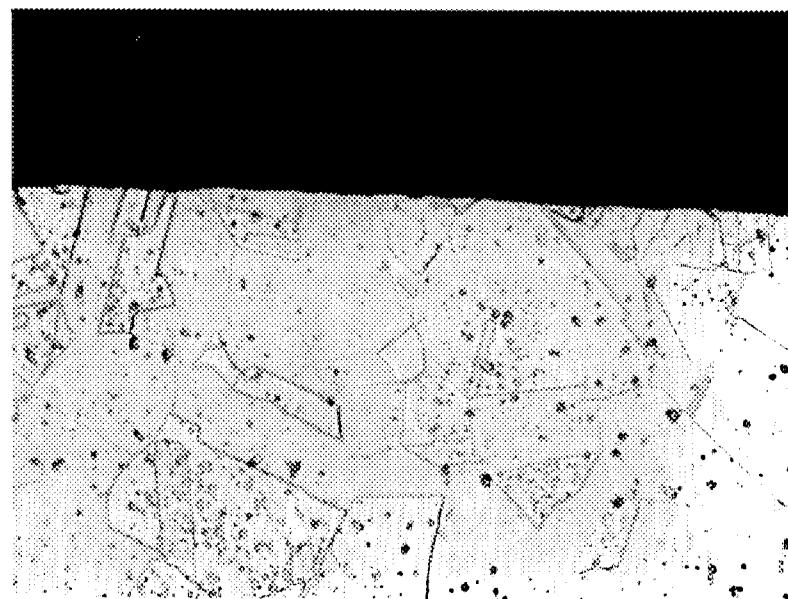
(2) 応力腐食割れ (SCC : Stress Corrosion Cracking) 試験

負荷作用下の腐食試験として、矩形管状の試験片で予め冷却管断面の角部に圧縮あるいは拡げる方向に塑性変形を付与したものと、50mm×10mm×2mmの板状の3点曲げ支持試験片を供試した。3点曲げ支持では最大応力にして930MPa (=3 σ_y) を負荷している。

冷却管は大きな冷間加工を受けており、材料の組織を考慮した腐食特性評価が不可欠である。図17に示すCW材及びAN材のミクロ組織によれば、焼鈍によりAN材では結晶粒が多角形状に復し粗大化していることが分かる。また硬度も大きく異なり、荷重300gのマイクロビックカース硬度計によれば、表5に示すようにCW材では管外面の中心部では約110Hvに対し、内面コーナー部では121～125Hvと若干高い。一方AN材では何れの部位も約50Hvで延性が増している。



CW材（加工のまま）

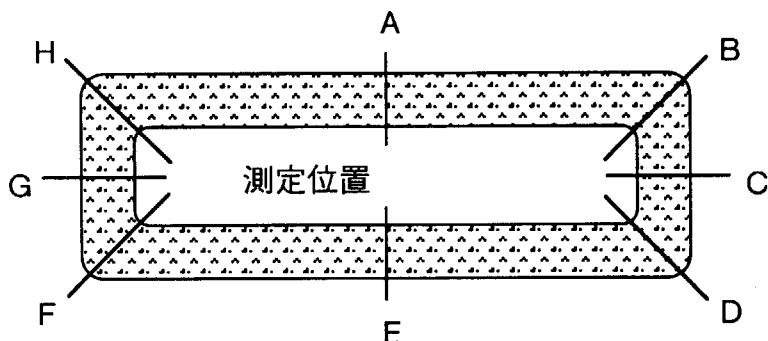


AN材（570°C, 30min. 加熱後空冷）

図17 無酸素銅のミクロ組織

This is a blank page.

表5 無酸素銅冷却管断面のミクロ硬さ分布

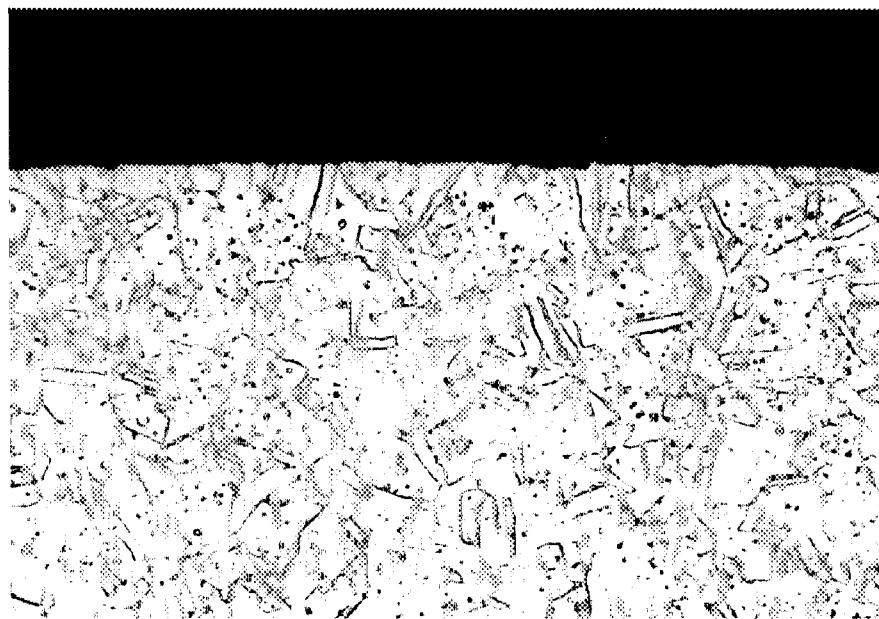


	断面位置								
	A	B	C	D	E	F	G	H	
冷間加工材	外側	114	105	111	109	113	114	112	112
	中心	112	114	110	121	106	117	113	116
	内側	107	121	117	125	113	125	110	121
焼鈍材	外側	47.3	48.7	49.3	56.4	45.4	57.3	46.3	50.6
	中心	49.9	48.8	50.2	48.5	44.2	46.5	46.3	50.8
	内側	50.9	47.9	47.9	53.1	46.0	48.3	47.6	49.4

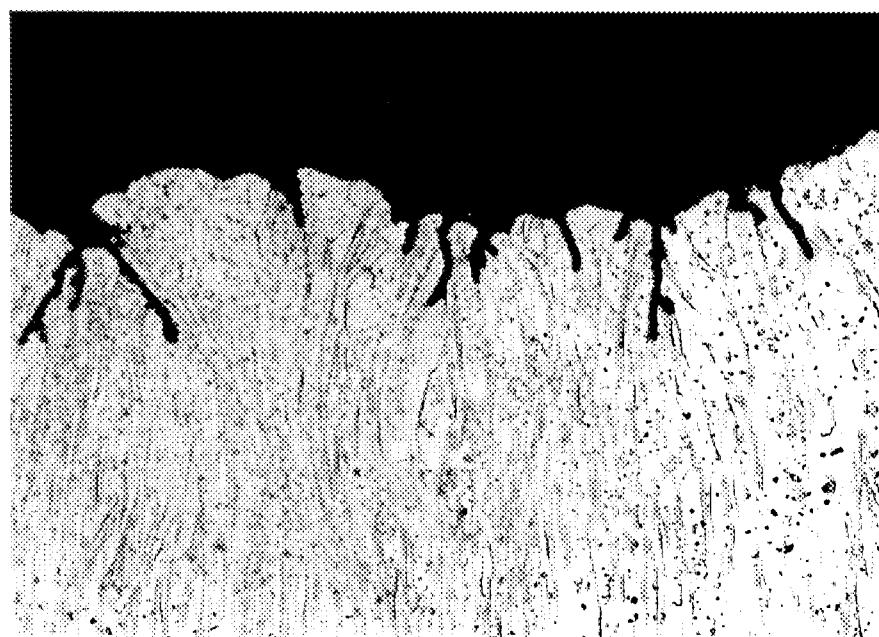
図18はCW材の無負荷状態の浸漬試験前の断面で、管内面のコーナー部には最大深さ75 μm 程度の割れが結晶粒界に沿って多数見られる。このような割れは内平面及び外面には観察されていない。何れの試験においても平滑部における割れの発生はなく、管内面のコーナー部の割れ深さの進展も認められていない。 CW材及びAN材とともに、フロリナート中では SCC感受性がないことを示しているが、管内面のコーナー部の割れの幅は1,000hrs浸漬後に若干拡大しており、割れ部では隙間腐食が進行している様子が伺える。しかし、その程度は極くわずかであり問題とはならない。

アンモニア水溶液中（15N-NH₄OH）における3点支持試験によれば、比較に供試した黄銅は浸漬して約50hrs後に粒内割れを生じているが、無酸素銅は約500hrsまで割れは発生しておらず、無酸素銅の耐SCC性は大きいと言える。銅合金のSCC現象の場合には、上記のように、ほとんどの場合アンモニア（NH₃）の存在が不可欠であることが知られている。共存物質としては水と酸素が重要であり、脱酸素下で

This is a blank page.



管内面の平面部



管内面のコーナー部

25 μm

図18 無酸素銅 (CW材) の試験片断面

This is a blank page.

は割れは生じない。NH₃以外ではクエン酸塩, FeCl₃, 炭酸塩, 塩酸, 硝酸などの水溶液中で割れを生じるが、フロリナート中ではこれらの物質が共存することは考え難く、環境的にSCCを生じることはないと思われる。

フロリナート中においては、銅表面は Cu₂O等の酸化皮膜で覆われ極めて優れた耐食性を示す。しかし、隙間部においては溶出した銅イオン (Cu²⁺) の加水分解反応によりpHが低下し、中性環境よりも腐食速度は増大する。この現象が管内面コーナーの割れ部で生じたものと思われる。フロリナート中では水分量が少ないために銅イオンの溶出量が少なく、また加水分解の反応速度も小さいものと考えられ、長期的には懸念する必要はないと言える。

4.2.2 TFC用冷却媒体の通路材料（ゴムホース／Oリング）

ゴムホース試験片としては実機用のものを（外径28mm, 内径16mm, 長さ5mm）に切断、またOリング試験片としては強度測定用（外径25mm, 内径21mm）のリングを、それ以外には（外径20mm, 内径16mm）のリングを用いた。供試した試験片を図19に示す。これらを、溶液を満たしたパイレックスガラス製容器に 80°Cで3,000 hrs浸漬した。溶液としては、水分の存在の影響を考慮して

- (a) 水分量未調整（フロリナートのみ。水分約10ppm溶解）
- (b) 水分を100ppmに調整したフロリナート
- (c) 水分を500ppmに調整したフロリナート

の3種を検討した。

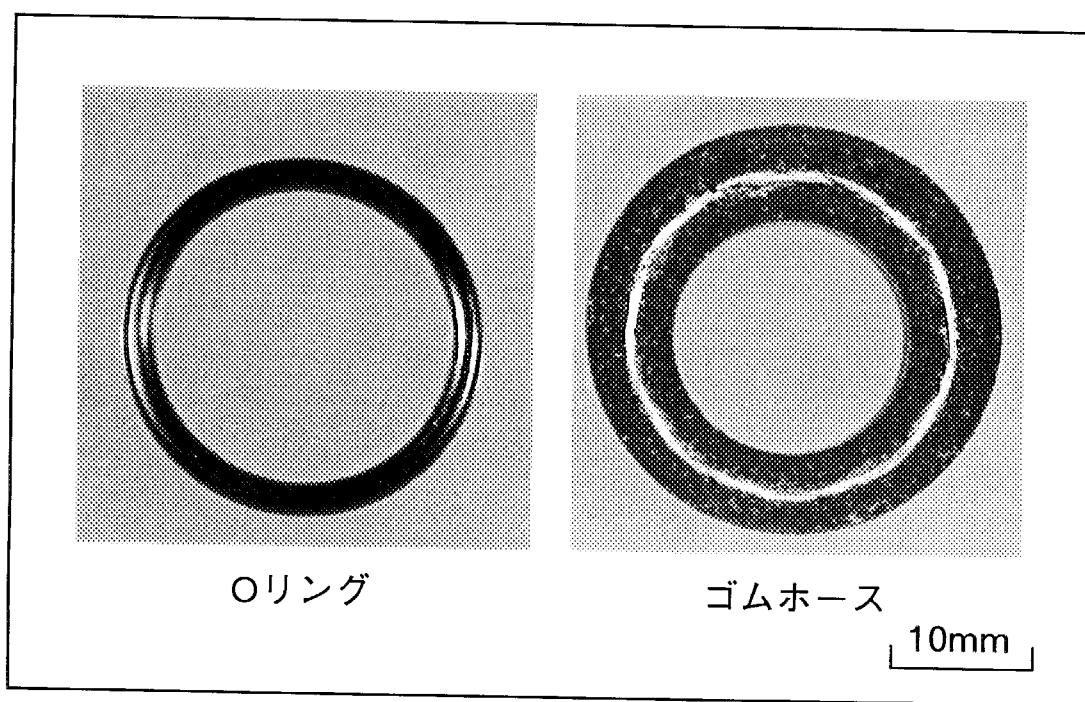


図19 ゴムホース／Oリング材試験片

This is a blank page.

先ずゴムホースの劣化は浸漬による重量変化、膨潤性及び強度変化により評価した。浸漬後の重量変化は3,000hrs後でも 10g/m^2 以下で、全重量の0.5%以下である。また、その減少量はフロリナート中の水分量に依存していない。図20に示す如く、3,000hrs 浸漬後における寸法は、ゴムホースの径方向で最大2%の変化が認められる。一方、長さ方向に関しては水分量の影響による差は殆どなく、ゴムホース全体の体積変化は少ないとから、機能上問題となる膨潤性は認められない。さらに引張り強度は浸漬前後に変化はほとんどなく、またFT-IR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) による成分分析によれば、 $2,800\sim3,000\text{ cm}^{-1}$ 付近にピークのあるゴム主成分に変化はないことが分かった。

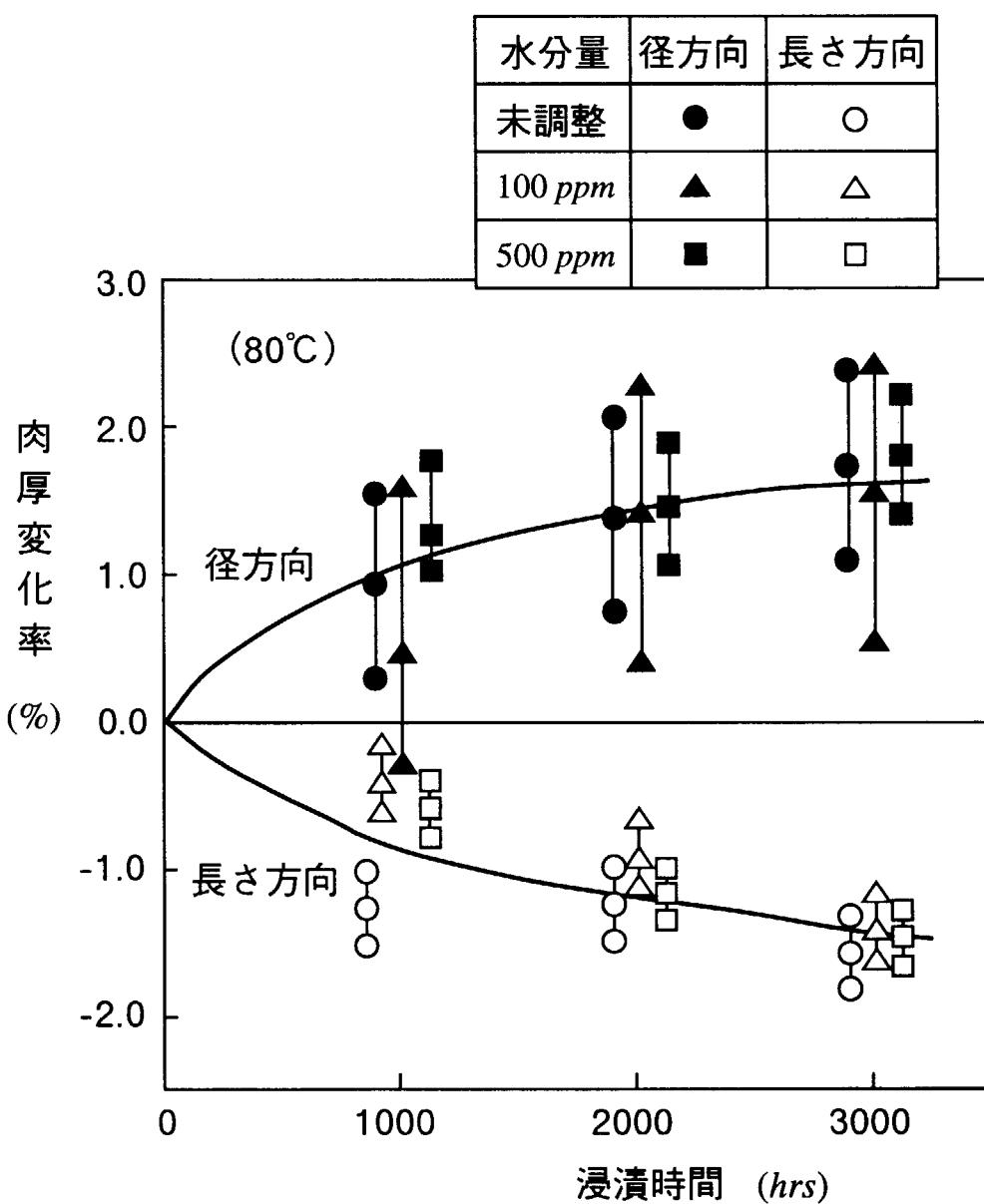


図20 フロリナート中におけるゴムホースの膨潤性

一方、FT-IRで浸漬溶液を分析したところゴム主成分が溶出した形跡が認められ、また発生ガスのガスクロマトグラフィー分析によればCO₂, CO 及びH₂が検出されている。これはゴムホース成分の分解によると考えられるが、10⁻⁵mol 程度と微量で劣化は軽微である。なお、水分量は浸漬前後とも約 10ppmで変化は認められない。

Oリングにおいては、3,000hrs 浸漬による重量増加は3.6g/m²で全重量の約0.5%に相当するが、フロリナート中の水分量に依存していない。Oリングの肉厚は3,000 hrs 浸漬後最大3%程度の膨張を示すが経時的な変化は少なく、Oリングの機能上は問題はないと考えられる。

SEM観察によれば、図21に示すように、浸漬後に肌荒れが見られるが、これはOリング成分中の可塑剤として含まれるアビライン酸エステルなどが溶出したものと考えられる。なお、強度は浸漬により変化していない。また、浸漬溶液中にCO₂, CO, CH₄ 及びC₄H₈が検出されているが、10⁻⁵mol 程度と微量であり劣化程度は極めて小さいと考えられる。浸漬による発生ガスの成分分析結果を表6に示す。

表6 ゴムホース, Oリングの浸漬により発生する
ガスの成分分析結果 (80°C, 3000hrs)

(μl)

項目	<i>H₂</i>	<i>CO</i>	<i>CO₂</i>	<i>CH₄</i>	<i>C₂H₄</i>	<i>C₄H₈</i>	<i>C₆H₁₄</i>
フロリナートのみ							
水分未調整	<1	<1	156	<0.1	<0.1	<0.1	4
水分 500 ppm	<1	<1	156	<0.1	<0.1	<0.1	4
ゴムホース浸漬							
水分未調整	58	270	2600	<0.1	<0.1	<0.1	4
水分 500 ppm	200	290	3100	0.1	<0.1	<0.1	5
Oリング浸漬							
水分未調整	2	169	416	0.7	<0.1	0.1	5
水分 500 ppm	12	208	1820	0.8	<0.1	0.4	6

[試験条件] フロリナート : 100 ml
ゴムホース : 77 cm² (長さ 50mm)
Oリング : 91 cm² (20個)

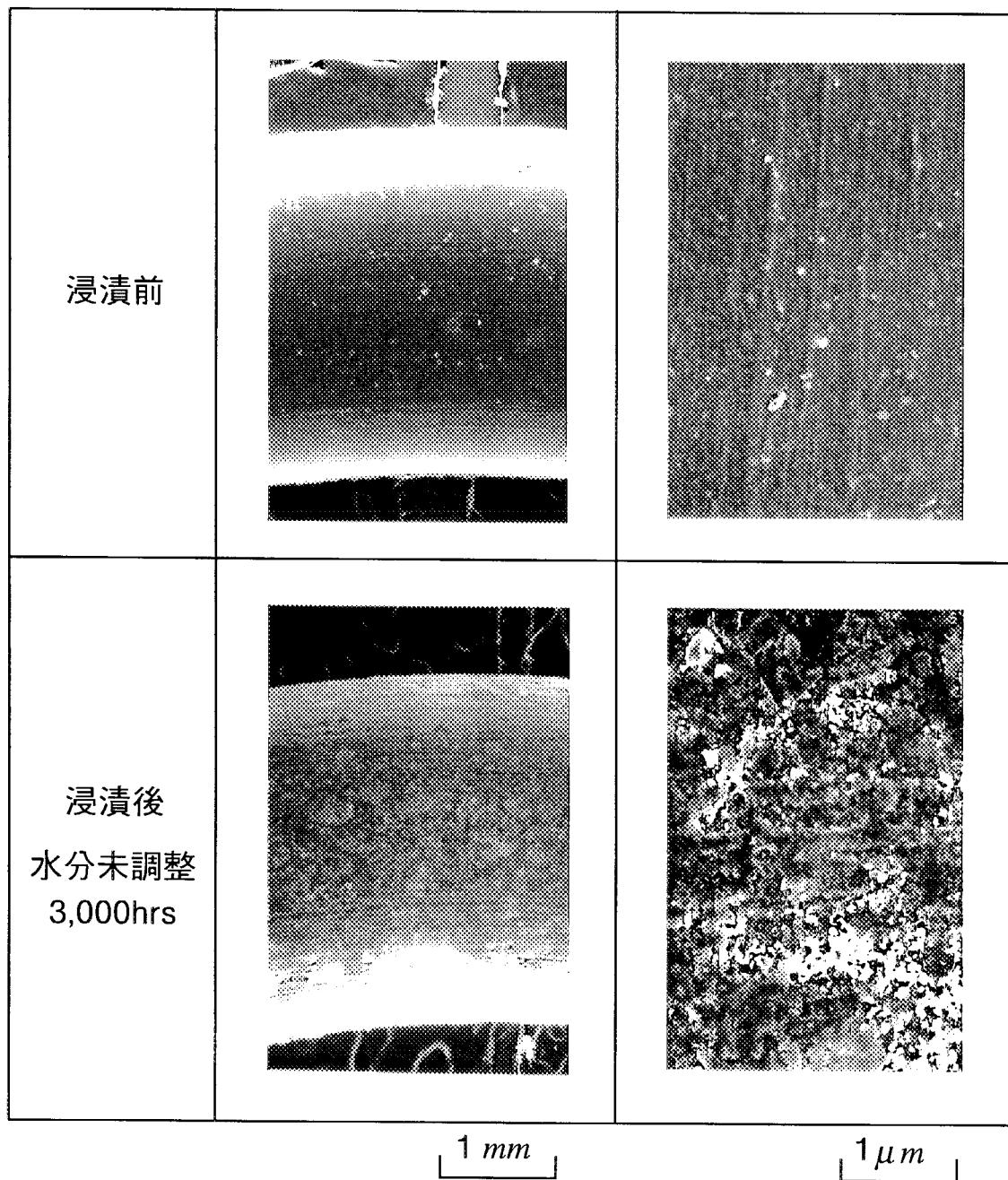


図21 フロリナート浸漬によるOリング表面の変化
(SEM観察結果)

This is a blank page.

4.2.3 TFC外枠材料（高マンガン鋼）

供試材の化学組成を表7に示す。本材料は80°Cで0.2%耐力 $\sigma_y = 360\text{MPa}$ 、引張り強さ $\sigma_R = 877\text{MPa}$ で、伸び69%、絞り50%である。

(1) SCC感受性評価試験

板状（70mm×10mm×2mm）の表面を湿式で#1000エミリ紙研磨仕上げした試験片を、図22に示す4点支持法により最大応力（ $2/3\sigma_y \approx 240\text{MPa}$ ）を負荷した。これらを溶液を満たしたパイレックスガラス製容器に80°Cで3,000hrs浸漬した。溶液としては下記の2種類とした。

- (a) フロリナートのみ
 - (b) フロリナート800mlに層間絶縁材の粉末約2gを混合した溶液

フロリナートのみに浸漬した場合、表面状態は 3,000hrs 後においても浸漬前と変化はない。これに対し、層間絶縁材の粉末と混合した溶液に浸漬した場合には、割れの新たな発生等は認められないが、図23に示すように局部的に孔食が発生している。孔食の深さは 3,000hrs 経過後に約 $20 \mu\text{m}$ に達しているが、経時的な成長はあまり見られない。

上記の孔食の発生メカニズムは、絶縁材の粉末が付着した下部で酸素の拡散が抑制され、付着していない部分との間に酸素濃淡電池を形成することによると思われる。すなわち、付着物下の隙間部において（1）式の金属のイオン化と（2）式の加水分解によるpHの低下が生じ、腐食が進行、酸化物と孔食の形成を伴うことが知られている。



しかし、本試験結果では孔食部においても割れの発生は認められず、この環境でのSCC感受性はないと考えられる。また発生した孔食の成長は極めて小さいので、TFC外枠構造材料へのフロリナートの影響は特に問題はないと言える。

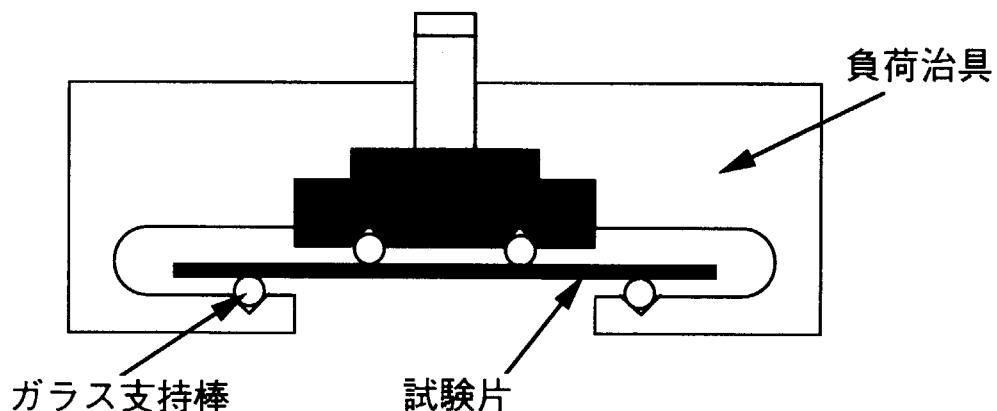
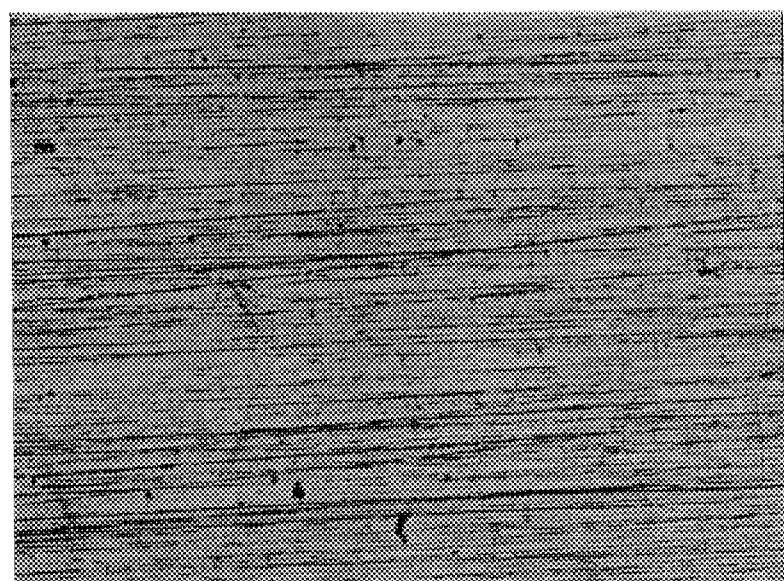
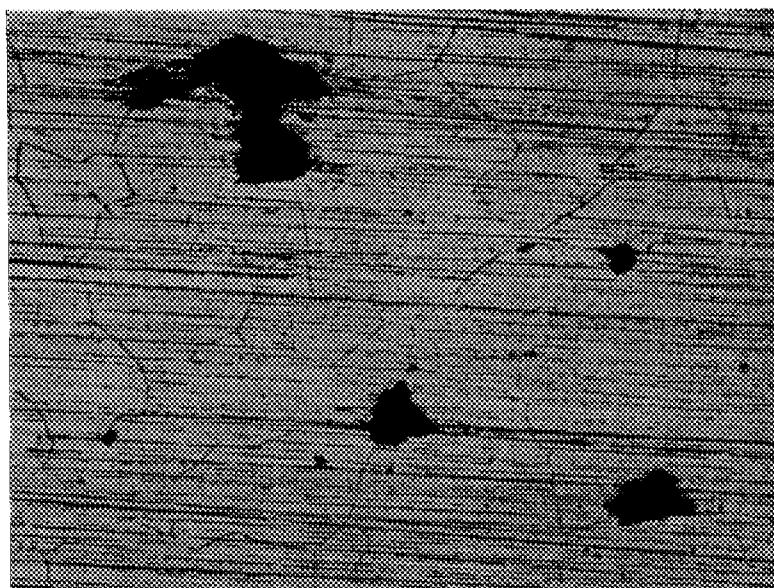


図22 4点支持試験治具の構成

This is a blank page.



(4点支持試験前)



(4点支持試験後)

図23 高マンガン鋼の表面の孔食発生 (80°C、3,000hrs)
(フロリナート／層間絶縁材粉末の混合溶液)

This is a blank page.

(2) 定荷重負荷試験 (UCL : Uniaxial Constant Load)

表面を研磨仕上げした柱状（試験部 $\phi 4 \times 20\text{mm}$ 、掴み部を含む全長105mm）の試験片（外観写真、図24）に、軸方向に一定引張り応力 ($\sigma_y \sim 2\sigma_y \approx 360 \sim 730\text{MPa}$) を負荷した。当該試験片を外部ヒーターで80°Cに保持されたパイレックスガラス製容器のフロリナート中に、一定荷重を作用しながら3,000hrs浸漬した。

試験によれば、外観に関して変色などはなく、光学顕微鏡写真において割れの発生はないことが確認された。一般に、鉄鋼材料が SCC を生じる主な環境としては、硝酸塩、炭酸塩、アルカリ、メタノール、アミン、CO-CO₂-H₂O、液体アンモニア、硫化物溶液などであることが知られている。フロリナートはこれらの物質と共存することはなく、環境的に SCC を生じる要件を満たしていないことからも、本結果は十分納得できるものである。

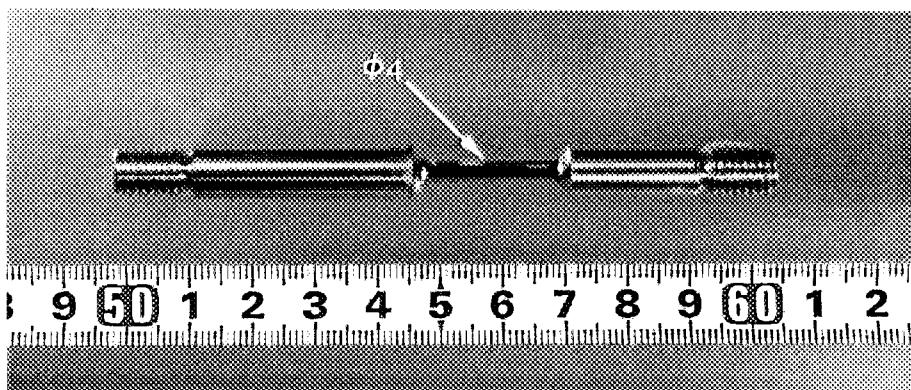


図24 単軸引張り (UCL) 試験片

4.2.4 TFC導体用の絶縁材料（エポキシ系樹脂）

供試材は層間及び対地絶縁材で、厚さは実機相当のものを供試した。層間絶縁材は、ポリアミド紙積層シート製の主絶縁材をエポキシプリグレガラス不織材製の寸法吸収材及びエポキシプリグレ樹脂フィルムで挟んだ、厚さ1 mmのシートである。対地絶縁材は、エポキシプリグレガラスマイカ製の主絶縁材とエポキシプリグレガラス製の外層絶縁材の2層構造で、厚さ10mmのシートである。これら各シートを切断して使用している。

- (a) 層間絶縁材……板状 (25mm[□] × 1mm)
- (b) 対地絶縁材……板状 (25mm[□] × 10mm)

これらを溶液を満たしたパイレックスガラス製容器に浸漬し、80°Cで3,000hrs保持した。溶液としては水分量の異なる3種としている。

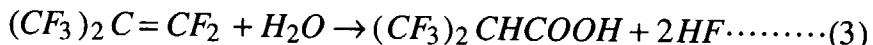
- (a) 水分量未調整（フロリナートのみ。水分約10ppm溶解）溶液
- (b) 水分を100ppmに調整したフロリナート800ml
- (c) 水分を500ppmに調整したフロリナート800ml

This is a blank page.

なお、対地絶縁材を対象として、80°C, 100°C 及び120°Cの水分量未調整（フロリナートのみ）溶液800ml中に1,000hrs浸漬し、温度の影響についても検討を加えた。

何れの溶液においても、層間及び対地絶縁材ともに若干の色合いの変化が見られるが、表面状態の変化は認められない。また、3,000hrsの浸漬試験後の絶縁抵抗率は浸漬前と変わらず、両者共に $10^{15}\Omega \cdot \text{cm}$ 以上を示している。さらに、浸漬試験（80°C, 3,000hrs）後のフロリナート中のイオン分析結果によれば、イオン濃度は何れの場合にも0.1ppm以下であった。特に、120°Cの高温においても絶縁材の劣化溶出は認められず、フロリナートの分解によるHFの生成も検出されなかった。

弗化水素（HF）の生成経路は、次式のPFIB（パーフロロイソブチレン）の加水分解によるものである⁽⁸⁾。



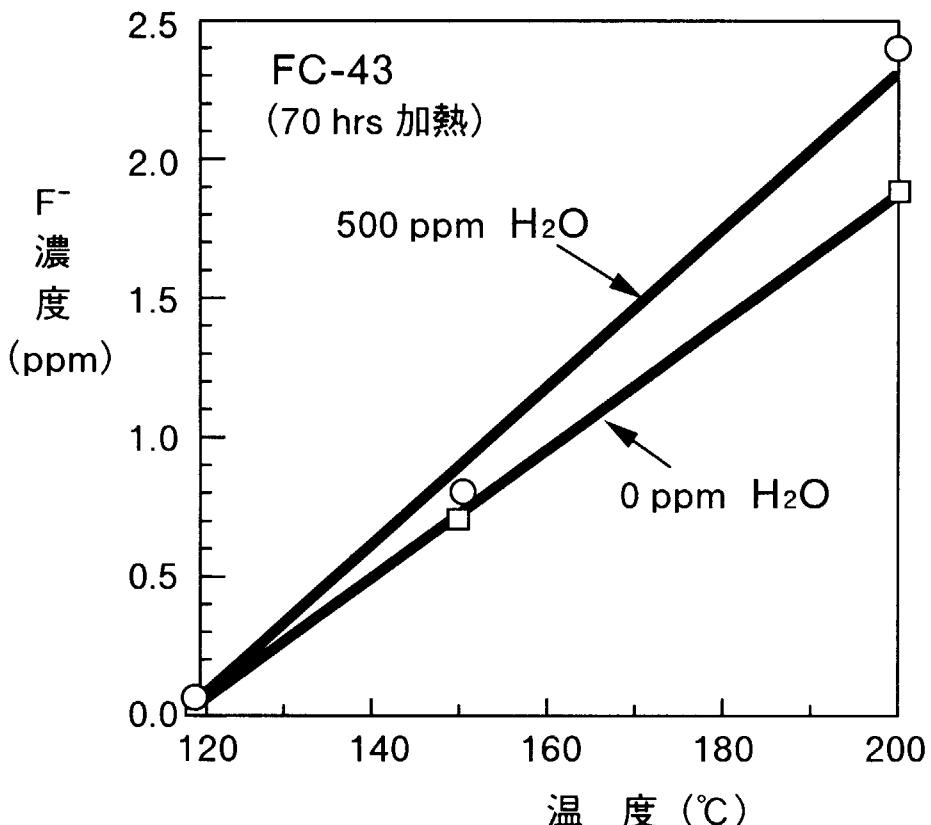
したがって、PFIBが生成する速度の温度依存性が問題となるが、180°C～380°Cの範囲で1年間に亘って検討された結果⁽⁹⁾によれば、210°C以下では分解は生じないことが示されている。また、水分を含む55°C及び100°Cのフロリナートでの実験⁽¹⁰⁾でもHFの生成を認められていない。これより、実機適用の温度範囲ではフロリナートの分解によるHF生成はなく、それによる腐食を懸念する必要はないと考えられる。

次に、冷媒としてフロリナートを使用している冷却管が埋め込まれているターンにおいて、層間短絡などに起因してより高い温度上昇が生じた場合には、より腐食性の高い弗化水素（HF）に代表される分解生成物が発生し層間絶縁材料への腐食作用を及ぼす。

フロリナート「FC-43」のみ、及び500ppmの水分を付与したFC-43の入ったテフロン密閉容器を圧力容器に入れ、120°C, 150°C, 200°Cの高温雰囲気に70hrs保持、分解生成物「弗化水素（HF）」の濃度を定量分析した。FC-43及び水分を含むFC-43の何れにおいても、弗化水素（F⁺）の濃度は保持温度の上昇とともに増加し、500ppmの水分を含むFC-43では200°Cに70hrs保持した場合、図25に示すように、約2.4ppmになることが分かった。

この分解生成物を含む状態において、層間絶縁材料の腐食状況を評価した。すなわち、板状（25□×1mm）の層間絶縁材料を溶液の入ったテフロン容器に密閉して圧力容器に入れ、これを所定の温度の恒温槽中で所定の時間保持した。具体的な溶液としては、

- (a) 実機の不測の事象に最も近い条件……FC-43のみ及び500ppmの水分を付与したFC-43を、120°C, 150°C, 200°Cの高温雰囲気に70hrs保持して得られた分解液
- (b) 厳しい条件となる加速液……水分を含むFC-43に弗化水素（F⁺）2.4ppm、その5倍の12ppm、及び10倍の24ppmを含ませた3種

図25 FC-43中のF⁻濃度に及ぼす加熱温度の影響

(c) より厳しい条件となる加速液……水分 (H₂O) に弗化水素 (F⁺) を2.4ppm、その5倍の12ppm、及び10倍の24ppmを含ませた3種を検討した。

(1) 表面性状の観察結果

○ 外観写真

試験前と比較し、何れも試験温度に依存してやや黄色あるいは茶色に着色。若干の浸漬温度依存性が認められる。

○ SEM観察

図26に示すように、試験前に対してガラス纖維を覆っていたエポキシワニスが溶出し、ガラス纖維が露出する傾向が伺える。この変化はフロリナート中での試験より水溶液の場合に顕著である。

(2) 化学成分分析

蛍光X線分析によれば、500ppmの水分を付与したFC-43の200°C分解液で、120°Cで1,500hrs保持後の絶縁材の表面では、Siの減少とCl及びSの増加が認められる。弗化水素 (F⁺) 2.4ppmの高濃度の場合には、Si及びKの減少とBi, Ca及びClの増加、さらに水溶液中ではSi及びKの減少とBi, Ca及びSの増加が認められる。

○ 表面皮膜

FT-IRによれば、浸漬試験前後におけるスペクトル的な変化は特に認められない。

○ 溶液への溶出

溶出成分としてCa, Al, Cl⁻, NH4⁺を分析したが、表8に示すように、水溶液中の場合が支配的でFC-43への溶出は極く微量である。成分変化としてはSiは減少、Bi, Ca, Cl, Sは増加の傾向にある。Siはガラス及びシラン系の表面処理剤に含まれており、水溶液やHFに溶解し易い。Na, Ca, Kなどはガラス繊維の成分であり、比較的溶解し難いと考えられる。Clはエポキシリングに、Sは硬化触媒に含まれているものと思われる。Bi, Ca, Cl, Sが増加する傾向にあるのは、Siが溶解し易く減少したために相対的に変化したものと考えられる。

(3) 絶縁抵抗の測定

500ppmの水分を付与したFC-43の200°C分解液で、120°Cで1,500hrs保持後の絶縁材の絶縁抵抗値の試験結果を図27に示す。試験前後で差異はなく $10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上を示す。しかし水溶液中への浸漬後では、 $10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ まで低下している。これは導電性の水分が樹脂中に含浸されたことによるものと推定され、逆にフロリナート中では機能的な劣化のないことを示している。

(4) 膨潤性

500ppmの水分を付与したFC-43の分解液で、80°C及び120°Cで1,500hrs保持後において下記の結果が得られている。

○ 重量変化

6~7mg/cm²の重量増加が認められる。これは試験片の切断面からの液の侵入によるものと考えられ、実際の使用においては問題にならないと考えられる。

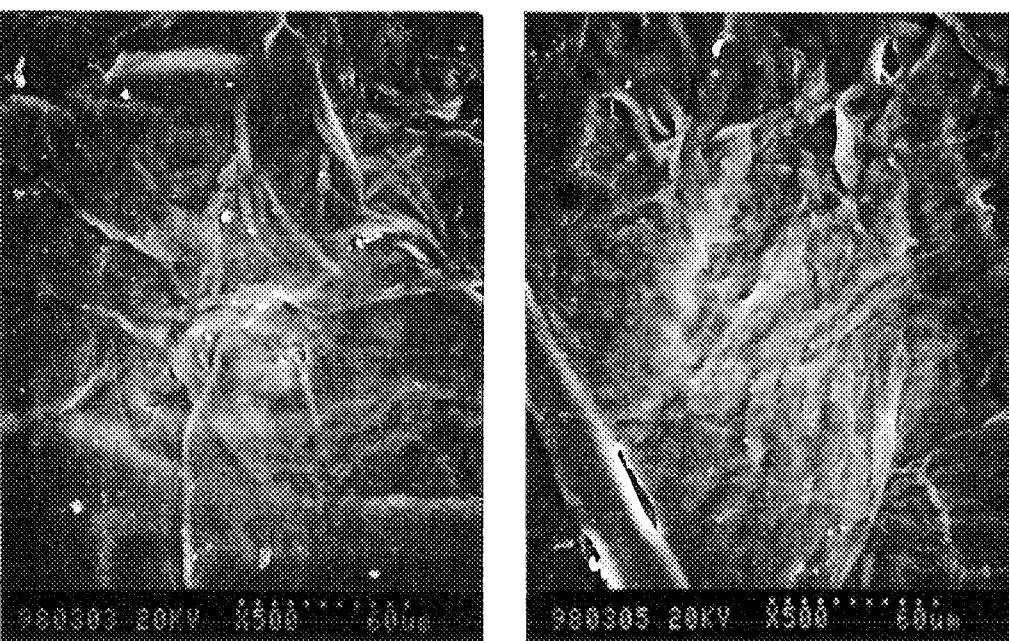
○ 寸法変化

厚さはほぼ不変で、長さは-50~-200μmの減少が認められる。

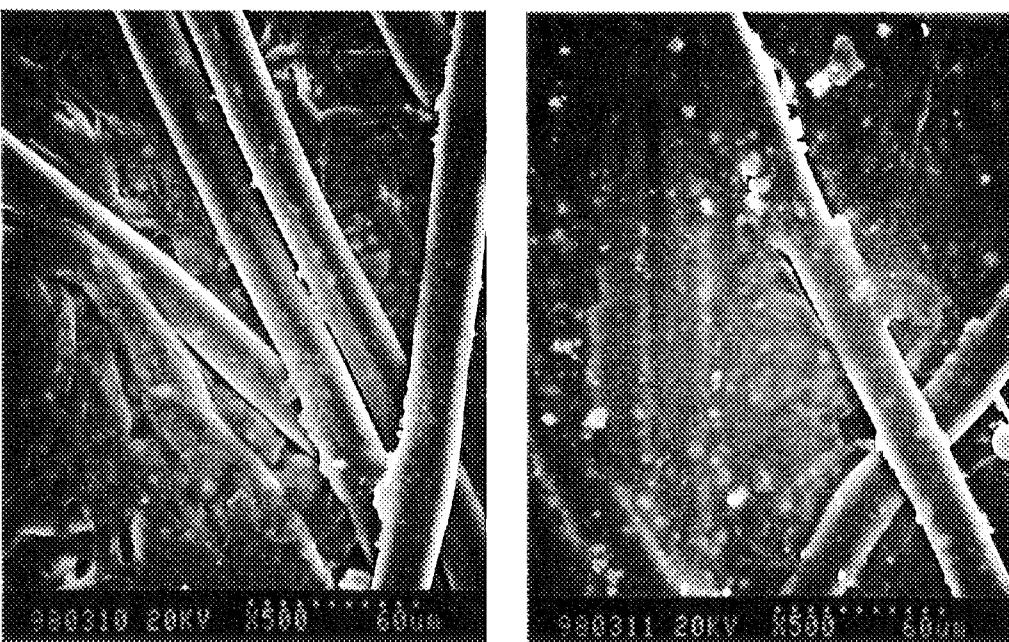
○ 硬度変化

分解生成物の影響はないが、若干の増加が認められる。フロリナート中で絶縁材料の構成要素であるエポキシ部の溶け出しにより重量変化や寸法変化が生じているが、これは試験片の切断面からの液の侵入によるものと考えられ、構造的には実際の使用において問題にならないと考えられる。

This is a blank page.



試験前



試験後

《FC-43+500ppm水分の分解液、80°C、1,500hrs》

図26 TFC絶縁材料の浸漬試験前、後の表面SEM写真

This is a blank page.

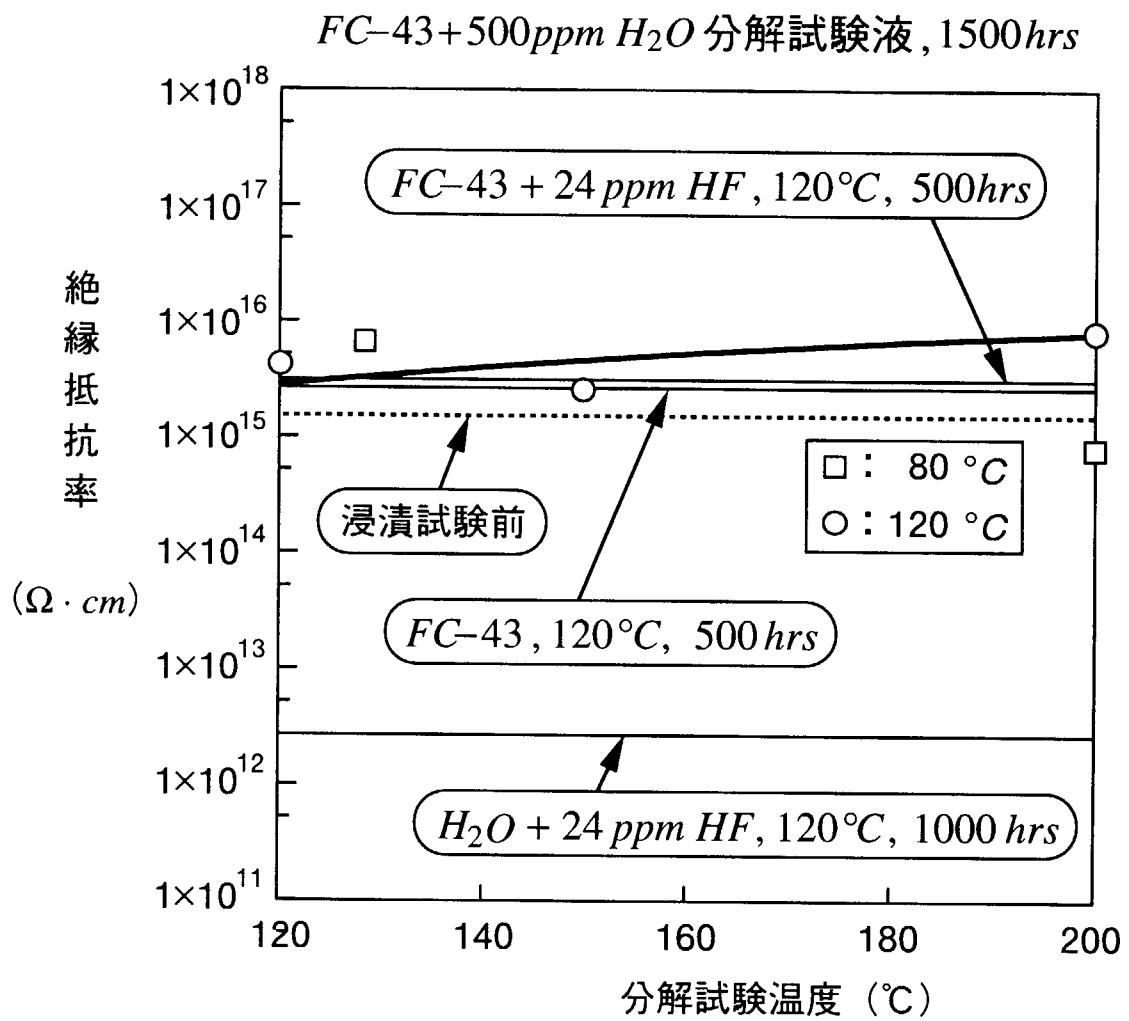


図27 TFC絶縁材料の絶縁抵抗率に及ぼす分解試験温度の影響

表 7 高Mn鋼の化学組成

材質	C	Mn	P	S	Si	Cr	N	Ni	V
NMJ-40BP	0.56	18.4	0.018	0.004	0.51	5.26	0.101	0.24	0.22

表 8 FC絶縁材料からの溶出成分定量分析の結果

試験条件	溶出成分濃度 (ppm)			
	Ca	Al	Cl ⁻	NH ₄ ⁺
FC-43 新品	<0.05	<0.05	<0.02	<0.05
FC-43 + 24 ppm HF, 120°C, 500 hrs	<0.05	<0.05	<0.02	<0.05
H ₂ O + 24 ppm HF, 120°C, 1000 hrs	0.20	0.07	9	11
FC-43 + 500 ppm H ₂ O 分解 (200°C), 120°C, 1500 hrs	<0.05	<0.05	<0.02	0.16
FC-43, 120°C, 1500 hrs	<0.05	<0.05	0.04	<0.05

5. 結 言

運転開始以来10年以上を経過し、老朽化により一部のTFC導体用冷却管に割れが発生し、当該冷却管を無通水にしてJT-60の放電実験が継続されている。さらに割れ発生が増加した場合には、この実験継続に支障を来たすことが懸念されるので、高い電気絶縁抵抗を有するフルオロカーボン（商品名：Fluorinert, 3Mの登録商標）を水に代わる冷媒として使用すること考え、使用に当たっての問題点について図28に纏めたようなシナリオの下に検討を加えた。その結果、下記の結論を得た。

フロリナートの基本的な性質を調査した結果、

- (1) 塩素原子Clを含まず、オゾンの破壊には関連しない。
- (2) 最近高い関心の寄せられている地球温暖化への影響は少ない。
- (3) 水に比較し冷却特性はかなり低下するが、それでもJT-60の現状の実験効率の維持には有効である。

次に、フロリナートとその流路を構成する材料との腐食反応を様々な状況を想定して評価した。先ず、TFC構成材料である銀入り無酸素銅、および流路を形成しているゴムホース、Oリングの腐食・劣化挙動を検討し、下記の結果を得た。

(4-1) 冷却管材料である無酸素銅では表面に厚さ数100Åの酸化銅の皮膜が形成されるが、皮膜の保護性により経時的には腐食速度は低下し、且つ腐食量は長期的にも極めて少なく、実機適用条件の範囲では問題とはならない。

(4-2) 冷却管の内面コーナー部は製作時に冷間加工を受け、深さ数 $10\mu\text{m}$ 程度の微細な割れが生じているが、この割れ部でもフロリナート中でSCCを誘起しない。なお、この割れ部で浸漬初期にわずかに隙間腐食の発生が認められるが、長期的に進展することはないと考えられる。

(4-3) ゴムホース、Oリングにおいてはともにフロリナートによる重量変化及び膨潤量は極めて少なく、強度変化も認められず、機能上の問題は生じない。但し、Oリングでは微量であるが、可塑剤の溶出による肌荒れが認められる。

さらに、外枠材料である高マンガン鋼及び絶縁材料へのフロリナートあるいはその高温分解生成物の影響について検討し、下記の結果を得た。

(4-4) 外枠材料である高マンガン鋼はSCC感受性を示さないが、白化した絶縁材の粉末が混在したフロリナート中では孔食を発生する。

(4-5) 層間及び対地絶縁材とも、フロリナート中で絶縁抵抗の変化及び溶解は認められない。絶縁抵抗値は $10^{15}\Omega \cdot \text{cm}$ 以上を保持しており、浸漬前に比べて特に劣化は認められない。構造的、成分的に若干の変化は見られるが、絶縁材料としての機能は維持されている。

以上の結果は、フロリナートを冷媒とした場合において腐食・劣化に関する大きな問題はないことを示している。しかし、残念ながら中性子照射環境下でのフロリナートの変質に関するデータがない。JT-60における放電実験の継続のために、今後検討されることを期待したい。

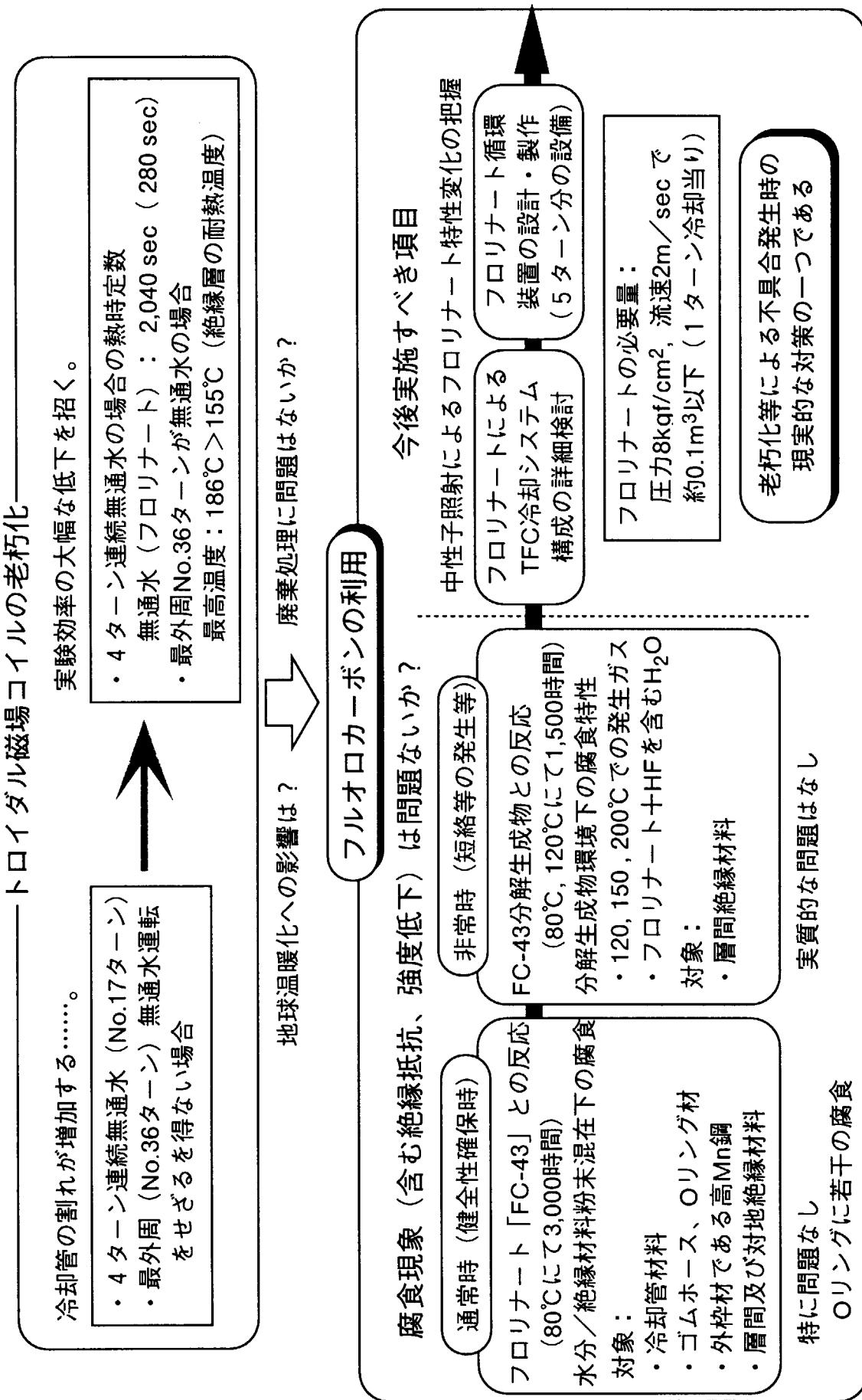


図28 純水に代りTFC冷却にフルオロカーボンを使用した場合の検討

謝 辞

本報告書をまとめに当り、有意義なコメントを頂いた細金延幸 JT-60第2試験室長、懇切なご指導を頂いた核融合装置試験部の清水正亜次長、船橋昭昌部長に深く感謝致します。また、腐食試験等に携わった（株）日立製作所及び日立協和エンジニアリング（株）の方々に深くお礼申し上げます。

参考文献

- (1) J. R. Last, et al : FUSION TECHNOLOGY 1990, p.1609-1613.
- (2) 住友スリーエム（株）；フロリナート・パンフレット
- (3) 尾見信三、他3；旭硝子工業技術奨励会研究報告、48巻(1986), p.221-229
- (4) H. Tamai, et al ; Fusion Engineering and Design 38 (1988), p.429-439
- (5) 轟原ひとみ、他1；第40回腐食防食討論会予稿集、C-312(1993), p.515-517,
- (6) 光本誠一、他1；腐食防食'88講演集、88B-201(1988), p.173
- (7) L. H. Lee ; Corrosion, 26 (1970), p.529-532,
- (8) L. J. Turbini, et al ; ELECTRONIC PACKAGING and PRODUCTION, January (1980), p.49-59
- (9) 追立俊郎、他4；昭和62年電気学会全国大会予稿集、No.377(1987), p.449
- (10) 金野由香、他1；第40回腐食防食討論会予稿集、A-302(1993), p.117-120

This is a blank page.

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	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
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	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	N·m
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
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
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ′, ″
リットル	L, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

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

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バーン	b
バール	bar
ガル	Gal
キュリ	Ci
レンントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$$1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1 eVおよび1 uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクトも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表す場合に限り表2のカテゴリに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリに入れている。

換算表

力	N(=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.4822	0.453592	1

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s} (\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P} (\text{ポアズ}) (\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St} (\text{ストークス}) (\text{cm}^2/\text{s})$$

圧	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸	= 4.184 J (熱化学)
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹	= 4.1855 J (15 °C)
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵	= 4.1868 J(国際蒸気表)
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹	仕事率 1 PS(仮馬力)
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹	= 75 kgf·m/s
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸	= 735.499 W
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1	

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

(86年12月26日現在)

フルオロカーボンによるアロイダル磁場コイルの冷却