「極低温機器の信頼性について」

守 屋 潤 一 郎

日本電子株式会社, 新事業推進部, 極低温機器事業班 東京都昭島市中神町1418

(1972年 6 月15日受理)

“The Reliability of the Cryogenic System”

by Junichiro MORIYA

Section of Cryogenic Engineering, Division of Research and Development, JEOL Ltd.,
1418 Nakagami-machi, Akishima-shi, Tokyo.

(Received June 15, 1972)

Synopsis :

The improvement of reliability of the cryogenic system is now an indispensable requisite. It is no exaggeration to say that the cryogenic refrigerator is especially lagging behind the superconductivity devices in reliability.

This report describes what ideas are necessary to achieve a reliable cryogenic system design. These ideas were applied to the development of a small-sized helium refrigerator, particularly of its expansion engine.

As a result, we have succeeded in developing an automatic valve expansion engine, which provides a mean time between failures (MTBF) of 5,000 hrs at 70% confidence level.

1. はじめに

極低温機器の最近の傾向として、特に信頼性が要求されてきている。これは、極低温機器発展の歴史的背景から、こうした信頼性の要求がでてきていると考えられる。初期のやっとヘリウムを液化できた時代から、中期の複雑な保守を要したヘリウム液化機、そして現在の産業機器への脱皮、システムの複雑化、巨大化、そして要求性能の高度化、周辺技術の進歩、というような技術需要、発展からの当然の帰結として信頼性の要求がでてきた。例えば、システムの巨大化一つとっても、部品を直列につないだシステムでは、99.99%の信頼水準を持つ部品を使っても、10個で99.9%、100個では99%、1,000個では90%、5,000個では実に60%にまで信頼水準が低下してしまう、これもまた信頼性向上の声に拍車をかける一因であろう。

信頼性工学そのものは、米国ではすでに20年、日本でも10余年の実績があり、文献、参考書^{1)~5)}も多く、

信頼性管理については多くの組織で採用実施している。従って、読者には充分知りつくされていることではあろうが、信頼性工学について未だ経験の少い筆者が、あえてここで筆をとるのは、半ユーザー、半メーカーの立場でもって、極低温機器が超伝導応用装置に比べて立遅れの感なきにしもあらずの現状から脱却し、その発展躍進の一助になればと考えたからである。

2. 信頼性について

信頼性管理は、いわゆる品質管理と異り、時間に関する品質保証の確率的表現であるといえる。品質管理が工程中心、特性値そのものを管理限界内に抑えることに対し、信頼性管理は、設計、故障中心で特性値の経時変化、もしくは故障率を管理限界内に収めるという違いがある。しかしながら、互いに相補的なものであり、良い品質は高信頼性への大きな要素である。

信頼性の定義は、「ある系、あるシステムを、ある

環境動作条件のもとで、ある所要の時間、ある所要の動作、機能を行ないうる、または実施し得る確率」とされている。この定義に従って以下の話をすすめていくことにする。

まず、信頼性を必要とする系、システムの範囲をどこまで含めるかを定義する必要がある。例えば、超伝導マグネットの連続冷却用ヘリウム液化冷凍機の場合、超伝導マグネットはもちろん、安全装置、クライオスタット、トランスファータブ、ヘリウム液化冷凍機本体、コントロールユニット、およびコンプレッサーまで含めて考えてみる必要がある。またシステムの一部として、人間を含めるかどうかは、誤操作の多い人間系に対して、フル・プルーフの設計範囲をどこまですすめるかという問題と組合せて検討しなければいけない。環境動作条件としては、温度、湿度、気圧等の一般的な環境条件の他に振動、衝撃、負荷、使用者の技能、使用の方法、輸送および梱包まで考え、どのような環境条件で動作させねばならないかを規定する必要がある。ヘリウム液化冷凍機の場合、超伝導マグネットが核磁気共鳴吸収装置その他の分光分析装

置と組合わせられるためほとんど空調室におかれるが、コンプレッサーは地下室におかれたり、またはほとんどが室外の仮小屋のな場所に設置されることが多く、温度は 40°C から -20°C、湿度は 20%~90% にも変化する環境条件におかれる。超伝導マグネットの普及とともに、ヘリウム液化冷凍機の使用者は、これまでのように物理屋や、低温の知識を有する研究者から、低温に関してまったくの素人に等しいオペレーターや技術者にまで使われるかも知れないという点も、設計の中で当然検討すべき項目である。梱包、輸送においても、例えばジェット機による空輸の場合もあり得ることであり、その場合には、1万メートルの高度で輸送され、その貨物庫は -60°C にもなり得ることであり、これらの点も輸送、梱包の環境条件の一つになる。所要の時間は、単に時間を示すということだけでなく、時間に相当する尺度、動作回数、サイクル、例えば自動車の場合などは距離で規定される。超伝導マグネットを連続冷却する場合、超伝導マグネットそのものは励磁後の安定度のためにも、また高均一度に調整した後は永久磁石にしておくことが必要にな

表 1 信頼性向上のポイント

I 信頼性の計画

1. 信頼性仕様の決定
2. 環境動作条件の設定
3. 保全性仕様の決定
4. 設計の信頼性に関するチェックリスト
5. 信頼度測定チェックリスト
6. 信頼性試験方法の決定
7. 故障および保全に関する報告様式の決定

II 装置の具体的設計

1. 装置部品の信頼性仕様
2. 装置部品の保守性仕様
3. 高信頼市販品のリスト・アップ
4. 部品寿命の決定
5. 検査および交換の仕様
6. 調整および安全限度の規定
7. 主要部分への故障表示装置、自己監視装置、自己較正装置の取付
8. 故障予測および保全予測
9. 熱設計 (吸熱、発熱、放熱、断熱)
10. 短寿命部品に対する欠長設計
11. 信頼度および MTBF の予測
12. 標準交換部品の規定
13. 最小の保全技術、技能、工具の規定
14. 経済性および安全性

III 製造の方法

1. 技能標準の設定と技術者の選定
2. 下請業者の能力調査と選定
3. 購入品の信頼性のチェック
4. 中間検査と最終検査
5. 重要部品の再試験
6. エージング装置
7. 治工具の完備
8. 検査工程、規準、手順の確立

IV 操作および保守

1. 操作マニュアル
2. 保守マニュアル
3. 取扱い、包装、保管、輸送の仕様
4. 据付マニュアル
5. 交換部品の信頼性の確保
6. 故障および保守に関する報告書
 - 故障発見の状況
 - 故障発見のきっかけ
 - 故障の種類
 - 故障の波及度
 - 故障の現状
 - 故障のモード
 - 故障の影響
 - 故障の測定

る。従って 4,000 時間から 8,000 時間、少くとも半年から約 1 年間連続冷却し、超伝導状態を保たねばならない。さらに、定期保守の時にも超伝導状態は保たねばならないので down time と称する不動作時間を warm up、部品補給待時間、保守、起動時間を含めて何時間以内に収めなければならないかが要求される。例えば、高均一度超伝導マグネットでは蒸発量 100 cc/hr でも、液体ヘリウムの貯蔵容量が 10ℓ とすると down time として 100 時間以内に限定されることになる。またさらに所要の動作機能ということに関して動作そのものの定義をする必要があるが、単に動作機能ばかりでなく故障の定義もする必要がある。故障の内容、範囲、判定の基準、検知、故障率の予測、故障データー、どんな故障がどのようにどんな原因でいつどの程度発生するか、という細かい地味なデーターを蓄積し、信頼性設計へフィードバックする重要な作業である。超伝導マグネットの連続冷却用ヘリウム液化冷凍機では、単なる冷凍機の故障停止ということだけでなく、システム全体としての故障を考えなくてはならない。例えば超伝導マグネットの臨界に対し、冷凍機側としてはどう対処するか、故障とみなすか、1 プロセスとみるか、これらの対策をたてる。最後の確率という意味は機能動作の時間の関数としての一種の予測値という意味でとらえられる。例えば平均故障時間 (Mean Time Between Failure : MTBF) 5,000 時間というが、MTBF は、ある限られた稼動時間数、故障数とからポアソン累積確率表または図⁹などによって統計的に平均値を求めたものである。従って確率的な変動を伴うものであり、MTBF がある値付近にある筈だという確かさ(確率)を信頼水準と呼ぶ。(これよりはずれる確率を危険率という。またここで信頼水準という言葉は、信頼度 : Reliability の信頼ではなく Confidence Level のことである。) 本来なら MTBF は信頼水準 70% で 5,000 時間であるという表現になる。4,000 時間では信頼水準 90%, 3,000 時間では 99% の信頼水準があるといえることになる。従って MTBF 何千時間ということをよく目にするが、この信頼水準はどうかということを念頭におくべきである。将来はメーカー側も信頼水準何 % で MTBF

がいくらであるかということの規定するようになる。

3. 高信頼化へのアプローチ・ポイント

高信頼化へのアプローチにおいて特に注意すべき信頼性設計のポイントをあげてみる。

まず第 1 に故障の解析を行なう。故障の様子、原因、ストレス、影響、確率等について充分調査検討する。第 2 に、標準品の利用がある。それは比較的正しい条件やデーターが明確であり、特に電子機器部品については故障率等の発表が行なわれている例が多く、故障率の予測が可能になるからである¹⁰⁾。第 3 に、システム的な高信頼性設計を行なうよう念頭に置くことである。部品そのものの信頼性向上には限度があり、部品の信頼性を向上させるよりも比較的高信頼度の部品を使って、システム的に信頼度を向上させるのが、信頼性向上の大きなポイントの一つである。第 4 は保全性、利用度の向上である。故障しないようにするという単なる信頼性の確保から、故障したら直せる使用の

Fig. 1 Failure for cryogenic refrigerator.

信頼性の確保が必要である。保全性、利用度の向上というシステム全体の信頼性の向上を考えねばならない¹¹⁾。これには total・QC といういい方に対して、total・Reliability として組織的な活動が望まれる。第5に、比較的なおざりにされがちな設計管理、試験管理が重要なポイントであることを指摘しておこう。安全、技術レベル等の設計に対する評価基準およびチェック・リスト、さらに試験方法、特に加速試験を行なう場合、その故障データーが市場故障データーに対応するような有効な加速試験方法を確立する必要がある。下手な加速試験を行なうと、市場故障の分布状況と異

なる結果になり、単に市場故障を予測できないばかりでなく、間違った情報をフィードバックして信頼性設計を行ないかねない。

上記のような観点に基いて、小型ヘリウム液化冷凍機の信頼性向上をどう考えて実施していったかに関して検討した結果を報告する。この小型ヘリウム液化冷凍機についてはすでに報告⁹⁾したが、その前提となった信頼性設計の手法について主に話をすすめる。

高磁場核磁気共鳴吸収装置用超伝導マグネットの連続冷却で、操作、保守を簡単化して自動無人運転化し、小型高効率のヘリウム液化冷凍機の高信頼化を目

表 2 膨張エンジンの設計仕様

I システムの範囲	エンジン本体 (弁機構内蔵) エネルギー吸収制御機構 安全装置 回転・起動制御装置 人間系は含まない		
II 環境動作条件	周囲雰囲気 温度 熱収縮量差 回転数 荷重	エンジン $10^{-5} \sim 10^{-7}$ Torr. $10 \sim 20^\circ\text{K}$ 0.1mm 以下 200~500 rpm $0 \sim 15 \text{ kg/cm}^2$ の繰返し衝撃荷重	クロス・ヘッド 大気中 $20 \sim 25^\circ\text{C}$ $300^\circ\text{K} \rightarrow 10^\circ\text{K}$
III 動作時間	平均故障間隔 (MTBF) 定期保守間隔 平均 down time 補給品	5,000~10,000 時間 5,000 時間 50 時間以内 クロスヘッドおよびエンジン完成品 1 式およびシー ル・リング 1 式 (Redundancy 方式)	
IV 機能 第一次機能 第二次機能	高圧ガスの膨張による低温生成 エネルギー吸収 回転数制御 起動 高圧ガスの吸入と低圧ガスの排出		
V 動作	能力 サイクル数 ストローク ガス流量	10°K 出力 20W 200 rpm 30 mm 0.22 g/sec	
VI 故障範囲	出力低下 低温側温度の上昇 シール・リング摺動抵抗 リーク・ガス量 ガス流量増加 サイクル数変化	15W 以下 12°K 以上 $3 \sim 5 \text{ kg/cm}^2$ 以外 0.25 g/sec 以上 $200 \text{ rpm} \pm 20\%$	
VII 信頼水準	90%目標	70~90%	

標とした。まず手始めに、前述の高信頼性化のアプローチポイントのパターンに従って、既設のヘリウム液化機の故障状況の調査検討から始めた。この調査結果を Fig. 1 に示した。この調査は昭和 43~44 年ごろに実施したものであり、多少古いそしりはまぬがれない。調査の範囲は、自社の国産ヘリウム液化機を手掛りにして国内外の液化機に調査の手をのばした。またインストラクション・マニュアル、スペアパーツ・リストからもメーカーが予測している故障を知る資料の一つになった。Fig. 1 でみる通り、冷凍システムとしての信頼性向上のネックは、膨張エンジンにあるといつてよい。そこでこの膨張エンジンに焦点をしばって故障解析を行なった。特性要因図を作り、故障ストレス、故障モード、故障の影響、危険度、故障の範囲の定義、その上での機構の設計を行なった。

膨張エンジンの信頼性および保守性に関する設計仕様を表 1 に示した。信頼性の定義から、システムの範囲を規定し環境条件を想定、規定する。例えば環境条件として当然のことながら、エンジン部は $10^{-5} \sim 10^{-6}$ mmHg の高真空中で、 300°K から 10°K への温度変

化、そして 20 気圧の繰返し衝撃下にある。クロスヘッドはエンジンに比べて厳しい条件下にはない。時間については、超伝導マグネットそのものが 6,000 時間から 8,000 時間という要求があり、これに対し 3,000 時間から 6,000 時間の連続運転を可能にしたい。ヘリウムを連続で液化するという機能ばかりでなく、何が故障するかということも一応の予測を行なった。また信頼水準はどうとすべきか、90% とするか 70% とするか、30% のユーザー危険率は良いのか、一般に、地上システムのように保守ができる場合には 70~90%、車上、船上システムでは 90~98%、航空機の例のように保守が困難な場合には 99% 以上、そして宇宙船のようなほとんど保守が不可能な場合には、99.99% 以上の信頼水準を要求される。

これらを具体的に設計する時点では、価値分析、機能分析の手法を用い、膨張エンジンの構成としてのエンジン本体の形式、シール方法、弁機構、エネルギー吸収制御機構の検討において、多くの評価項目を羅列して直交評価法によって評価した。どのような項目に、どの程度に重みづけをして評価するかは、一つの技術

Fig. 2 Expansion Engine.

Fig. 3 Small-sized Helium Refrigerator.

であろう。このようにして試作した自動弁型膨張エンジンの外観写真を Fig. 2 に示した。これを構成部品とした小型ヘリウム液化冷凍機では、耐久連続運転の結果、MTBF 5,000 時間を信頼水準 70% で保証できることが確認された。小型ヘリウム液化冷凍機の外観写真を Fig. 3 に示した。

4. 結 び

以上極低温機器に対する信頼性工学の考え方を、信頼性の定義を中心にして説明し、具体的に超伝導マグネットの連続冷却用小型ヘリウム液化機に、どのように適用したかを述べてきた。これは筆者らのささやかな経験にもとずいた範囲のものであり、信頼性に関する十分な説明にはならなかったと思うが、この解説が、今後の極低温機器の信頼性向上の一助になれば幸いである。最後に、低温工学協会への提案として、信頼性に関する分科会を設け、研究会なり、信頼性データの蓄積なりを、統一された形ですすめられれば、低温工学の発展に、より大きな躍進をもたらすのではなかろうか。

参 考 文 献

- 1) 信頼性管理便覧編集委員会, 信頼性管理便覧, 日刊工業新聞社, (1964)
- 2) 塩見弘, 信頼性工学入門, 丸善, (1967)
- 3) 信頼性実施分科会, 信頼性ガイドブック, 日本規格協会, (1967)
- 4) S. R. Calabro, 信頼性概論, 日科技連, (1962)
- 5) 市田嵩, 保全性工学入門, 日科技連, (1968)
- 6) 信頼性文献抄録委員会, 信頼性文献抄訳集, 日科技連
- 7) MIL-HDBK-217 A.
- 8) W. G. Ireson, "Reliability Hand Book" McGraw-Hill, (1966)
- 9) 笠松, 他: 低温工学, Vol. 6, No. 5, 182 (1971)
- 10) 電子機器信頼性専門委員会, 電子機器の信頼性 日本航空工業会, (1965)
- 11) W. H. Hogan and J. T. Hravell, in Liquid Helium Technology, Pergamon Press, London (1966), p. 319.