

計画停電に伴って生じたヘリウム液化設備の一連のトラブルと復旧作業 ～制御用 PC の破損と相次ぐ冷却水制御センサー等の故障～

○西崎 修司、 多田 康平
京都大学 大学院工学研究科 技術部

1. はじめに

2018年12月23日(日)に京都大学桂キャンパスにて実施された、自家用電気工作物定期点検に伴う計画停電の際、復電作業時のミスにより、ヘリウム液化機制御用 PC に高電圧負荷がかかり、PC が破損して起動できなくなった。制御用 PC の修理の間、PC からではなく、液化機操作盤の直接操作によって液化機を制御する方法で対処したが、冷却水の設定の確認が不十分であったため、冷却水の流量センサーが破損するなど被害が拡大した。発表では、これらのトラブルの経過と復旧作業について報告する。

2. 計画停電における PC 破損と被害拡大の経過

今回のトラブルの経過を表 1 にまとめる。

京都大学では、1年に1回、自家用電気工作物定期点検の実施のために、計画停電をおこなっている。例年、桂キャンパスでは、10月上旬頃の日曜日の午前8時頃から午後5時頃までの間、この作業のために停電する。回収圧縮機などのヘリウム回収設備が使用できない停電中のヘリウム損失を防ぐため、計画停電実施日は、午前6時頃から設備の停電作業、昼にガスバッグにたまったヘリウムガスをバイパスで送る作業、停電終了ののち午後8時頃まで復電作業を実施している。普段の10月上旬頃の計画停電では、午後5時頃でもまだ日が高く気温も高いため、明るく暖かい部屋の中で計画停電の終了を待つことができる。

2018年度の桂キャンパスの計画停電は、当初9月30日(日)に予定されていたが、台風24号の接近により12月23日(日)に延期された。年末のこの時期になると、夕方には、暗く寒い部屋の中で停電終了を待つこととなった。あらかじめ停電時間内であっても定期点検が終了次第送電を始めるという通知があったこともあり、午後4時頃に部屋の電灯およびコンセントにつながるブレーカーを繋いでしまった。「計画停電終了予定時刻の午後5時まであと1時間ほどであり、点検もすでに終わっているだろう。終わっていてもあまり影響はないだろう。」という甘い考えがあったし、「送電すれば部屋の明かりが

表 1. 計画停電以降のトラブルと復旧の経過

| 年月日 | 出来事 |
|-----------------|--|
| 2018年 9月30日 | 桂キャンパスの計画停電が、台風24号の接近により12月23日に延期された。 |
| 2018年 12月23日 | 計画停電後、復電時のミスにより、液化機制御用 PC が2台とも破損した。 |
| 2019年 1月8日 | 操作盤の直接操作による液化運転を試みた。冷却水ポンプが稼働せず緊急停止した。 冷却塔水ポンプのみ手動で起動し再度液化運転を試みた。冷却水温度異常で緊急停止し、流量センサーが破損した。液化機の起動条件を満たすことができず、液化不能に陥った。 |
| 2019年 1月10日 | 業者殿が来桂し、速やかな復旧を相談した。流量センサーの配線短絡により、液化機起動条件を仮想的にクリアして、液化可能となった。 ただし、安全装置(冷却水流量センサーおよびタービン温度センサー)なしでの危険な液化運転であった。 |
| 2019年 1月15日 | タービン温度センサーのコネクタ部の交換作業を実施した。しかし、タービン温度異常は復旧しなかった。 |
| 2019年 2月～3月 | Windows XP 搭載中古 PC および関連ソフトウェアをネットストアから調達し、業者殿へ送付した。液化機制御等に必要なソフトウェアのインストールを実施した。 |
| 2019年 3月19日 | タービン温度センサー・冷却水流量センサー・液化機制御用 PC2 台の交換作業を実施し、これらのトラブルから復旧した。 |

点くことで定期点検の終了がすぐに判るだろう。」という考えもあったためである。ところが実際には、我々の設備に関係する箇所定期点検がブレーカー

の接続後に実施され、平常時よりも高電圧が印加されたため、コンセントからプラグを抜いていなかったヘリウム液化機制御用 PC が 2 台（主機・予備機）ともに破損し、送電後も PC を起動できなくなった。

別に用意した PC ヘデータ等に移すことで復旧を試みたものの、OS（Windows XP、この当時すでにサポートが終了していた。）の認証・制御用プログラムのライセンス認証・データ取得といった困難のために、学内では完全に復旧することはできなかった。また、年末年始ということもあり、業者殿に修理を依頼しても通常より時間がかかることが予想されたため、PC の修理ができるまでの当面の間、操作盤（Linde, OP270）の直接操作により液化機を制御することとした。年末に至急、業者殿に操作盤による液化機制御マニュアルの作成を依頼し、このマニュアルに基づいて、年明けの 2019 年 1 月 8 日（火）にヘリウム液化運転を試みた。マニュアルには冷却水ポンプの運転や制御についての記載がなかったため、冷却水を手動では運転せず、いつも通り自動の設定のままで液化運転を実施した。しかし、冷却水のポンプ類は操作盤に連動していなかったため、液化運転開始後 1 時間ほどで冷却水エラーが発生し、液化用圧縮機がトリップした。2 回目は冷却塔の水ポンプのみ手動で運転して液化運転を試みた。タービンの起動まではおこなうことができたが、急いで仕事を仕損じるので、冷却塔の散水ポンプを運転していなかったため、冷却水の温度が 80℃ 以上となり、温度異常のエラーで液化機が停止した。その後、冷却水のポンプ類をすべて手動で運転した状態で液化を試みたが、数時間待ってみても液化機の起動条件を満たさず、液化運転をおこなうことはできなかった。高温の冷却水が流れた影響で冷却水の流量センサー（EGE-Elektronik, SC 440/5-A4-GSP）が破損したため、十分な量の冷却水が流れていても流量不足と認識されるのだろうと考えられた（図 1）。

3. 復旧作業

2019 年 1 月 10 日（木）に業者殿に桂キャンパスに来て頂き、早急な液化設備の復旧を相談した。業者殿からは、「冷却水の流量センサーの交換はすぐにはできない。流量センサーに接続する配線を電氣的に短絡させれば、模擬信号によって液化機起動に対する流量センサーの条件を仮想的にクリアでき、液化機を起動させることはできる。ただしその場合でも液化機に何らかの異常が生じた場合に自動で停止させる安全装置は必要であるから、冷却水の流量を確認できないならば、タービンの温度を確認する温



図 1. 破損した冷却水流量センサー。フロントパネルの流量表示は冷却水の流量不足を示している。

度センサーは正常に機能していなければならない。」との回答であった。ところが、件のタービンの温度センサーは、数年前から異常な値を示していた。温度センサーに異常が見られ始めた段階で業者殿に修理の相談もしていたが、単なる異常値の表示だけでは液化機が止まることもなく、慌てて修理する必要もないという業者殿の回答であったため、そのままこの問題を先送りしていたのだった。今回、業者殿としては、冷却水流量センサーとタービン温度センサーの両方の安全装置が機能しない状態で液化運転をおこなった場合、大きなトラブルが発生する可能性があり、また、トラブルが発生しても自動停止できないため、液化運転を実施しても設備の保証ができない、との判断だった。我々は、タービンの外装を手で触って異常な高温になっていないことを逐次確認しながらであればトラブルが発生してもある程度対処が可能であるという判断のもと、トラブルが発生してもその責任は京都大学側が持つという条件で、液化運転を実施することとした。タービン外装を触って温度を確認するなど、液化機の経過観察をこまめに行いながら、結果的にはトラブルの発生もなく液化運転をおこなうことができた。

液化運転はとりあえず可能となったが、平常のヘリウム液化業務に戻るために、タービンの温度センサー・冷却水の流量センサー・2 台の液化機制御用 PC の修理を進め、設備の完全復旧を目指した。

タービンの温度センサーは、ヘリウム液化機の安全装置のひとつとして不可欠であり、早急な修理が必要であるため、まず、この部分を優先して業者殿に修理の依頼をした。「温度センサーの異常は、温度センサー本体の故障のほか、コネクタ部の接触不



図 2. タービン温度センサーのコネクタ。



図 3. タービン温度センサー本体。



図 4. 冷却水の流量センサー本体。

良の可能性も考えられる。センサー本体をタービン部分から取り外すのは手間がかかるため、すぐに作業可能なコネクタ部の交換を推奨する。」というのが業者殿の回答であった。安全装置がない状態での液化運転を続けることは避けなければならないので、業者殿に依頼し、2019年1月15日（火）に、ター

ビン温度センサーのコネクタ部（LEMO, FFA.1S.304. CLAC62）（図 2）の交換作業を実施した。費用は約 30 万円であった。しかしながら、コネクタ部の交換をしても温度の異常表示は変わらず、危険な状況での液化運転を避けることはできなかった。その後、業者殿より「温度センサーは簡単に取り外せるので、温度センサーを交換することにより、修理可能である。」との、以前に受けたものとは趣旨の異なる連絡があった。業者殿に対する不信感を覚えることにはなったが、コネクタ部を交換しても温度表示が正常でない問題を解決するために、さらに約 15 万円の費用（後述する流量センサーと同時作業のため、現地作業、エンジニアリング費が減額された。）をかけて、温度センサー本体（R. Flach Elektronik, Pt 100 mit Kabel）（図 3）の交換を 2019 年 3 月 19 日（火）に依頼、実施した。

冷却水の流量センサーも液化機の安全装置として重要なので、業者殿に依頼し、流量センサー本体（図 4）の交換も 2019 年 3 月 19 日（火）に実施した。費用は約 45 万円であった。結果、流量確認が可能となったため、模擬信号のためのセンサーの配線の短絡を外して、従来どおり冷却水の流量も液化機の起動条件に戻すことができた。

液化機制御用 PC2 台は、液化設備の運転・停止操作のみならず、液化機に関する日常データ・液化作業中の詳細データの保存と確認に有効であるため、速やかな復旧を目指した。これらの PC の OS は Windows XP であり、この当時すでにサポートが終了していた OS であったため、業者殿の方で PC を準備することができないとの回答であった。そこで、Windows XP を搭載した中古 PC2 台とそれらに対応する Microsoft Office ソフト 2 個を、合計約 3 万 5 千円でネットストアから購入した。それらの物品を業者殿に送付して、液化機制御等に必要なプログラムのインストールと設定を依頼した。費用は約 45 万円であった。その後、桂キャンパスでの作業を 2019 年 3 月 19 日（火）におこない、PC の問題も解決した。

4. 今後の対策

振り返ってみれば今回の一連のトラブルは、計画停電の際に、自己判断で通電前にブレーカーを繋いでしまったために、コンセントから切り離していなかった 2 台の PC に高電圧負荷がかかり、PC が破損したことに端を発している。今後の計画停電では、PC のプラグを確実にコンセントから抜くことにより、何らかのミスがあっても PC に被害が及ばないようにしなければならない。なお、その次の 2019 年

10月6日(日)に実施された計画停電の際には、コンセントからプラグを抜いていたにも関わらず、復電時に液体窒素汲出装置用PCが起動しなくなるトラブルが発生した。このPCは電源ユニットが故障しているものと判断され、このユニットを交換することで復旧した。また、この2019年の計画停電後には液化用圧縮機が起動できないという事象も起きた。しかしこれは圧縮機の故障ではなく、自家用電気工作物定期点検の後にキャンパス内で440Vの主電源を復帰し忘れていたのが原因であった。このように計画停電では、注意していても思いがけず様々なトラブルが発生する可能性があるため、故障した部品を速やかに交換できるように予備の部品をストックしておくなど、機械・設備に応じて対策を講じることが重要である。

また、今回報告したトラブルでは、操作盤の直接操作という普段とは異なる方法で液化運転を試みたことで、冷却水の確認が不十分な状況となり、トラブルの拡大を招いてしまった。このような非日常的な運転をおこなう場合でも、落ち着いて機械類の動作状況を確認し、より安全な方法を選択できるように努めなければならない。そのためには、どの作業の時にどの機械がどのように稼働しているか、どの機械とどの機械が連動しているのか、といったことにも日常から留意しておかなければならないと考えている。

さらに、日常的なメンテナンスの重要性も痛感した。普段はタービンの温度表示が異常であってもそれほど問題にならなかったため、修理を先延ばしにしていた。しかし、他の安全装置がはたらかない今回のトラブルでは、この温度異常が大きな問題となり、危うく液化運転すらおこなえないところまで状況が悪化した。時間的に余裕のある平常時にこの温度異常表示の原因を特定することができていれば、結果的に無駄だったコネクタ部の交換をせずに、最短経路で復旧を行えた可能性もあるだろう。今後、日常的なメンテナンスに努め、非常時でも立ち往生しなくて済むよう態勢を整えていきたい。

我々の日常的な業務だけでは対応できない問題もある。今回のトラブルの要因の一つとして、制御プログラムがOSに依存していることも挙げられる。桂キャンパスではいまだに、制御プログラムはWindows XPを搭載したPCでしか運用できない。今回のように古いOSを搭載したPCが破損した場合、制御プログラムに適合するOSを搭載した中古PCを調達するというやや煩雑なプロセスが必要となる。

現在のところ我々は、この古いOSを搭載したPCを何台かストックすることで対応している。最近では、特定のOSに依存しない制御プログラムも開発・普及が進んでいるようである。そのような制御プログラムへ一旦更新することができればこの問題は半永久的に解決するものと予想されるが、業者殿からは数百万円規模の費用がかかると伺っており、初期費用の高額さゆえ簡単な話ではない。今後、ヘリウム液化設備の増設・更新の機会があれば、その仕様書に、制御プログラムが特定のOSに依存しないこと、あるいは、特定のOSのサポート終了後に無償で新しいOSに対応できること、を加えることにより、この問題の解決が図れるのではないかと考えている。

5. 危機管理論

今回の一連のトラブルについて、危機管理論の観点から再度考えてみたい。危機に対する管理は、「危機が発生する前に損失などの回避や低減を図る行為」であるリスクマネジメント(Risk management)と「危機が発生したあとの対処」であるクライシスマネジメント(Crisis management)とに大別できる。

リスクマネジメントは、事業・業務にどのようなリスク要因があるかを発見・特定することから始まる。重大なリスクは低頻度であっても問題であるし、さほど重大でないリスクでも頻発すれば問題となるように、リスクの重要度はそのリスクの「頻度(発生確率)」と「影響度」の2軸で評価される。特定されたリスクをこの2軸で評価し、リスク対応の優先順位をつける。その後、優先順位の高いものから対策を施す。いちど対策を施した後も、対策のモニタリングや残留リスクの評価を続けていく。もちろんこれらのプロセスは、緊急事態が発生していない日常時に実施しなければならない。また、人間の想定できる範囲は限られているので、「想定外」も発生して、リスクマネジメントだけでは全てのリスクに対処しきれないことも予想しておくべきだろう。

今回の一連のトラブルにおいて、液化機制御用PCの破損とタービン温度センサーの問題に関してはリスクマネジメントの観点から論じることができよう。液化機制御用PCが一旦破損すれば液化機の監視・制御に大きな影響が出ることは明らかであるが、積極的に電源を切ったりするのは年1回の計画停電時のみなので、発生頻度は小さい。発生頻度の小ささゆえに、このPC破損のリスクの重要度を小さいものと誤って評価していたのが問題であったといえる。タービンの温度センサーについては、数年前から温度の異常表示が続いていたので発生頻度は非常に大

きいが、平常時の影響はほぼなかった。そのため、このリスクに対する我々の重要度（優先順位）は小さかった（低かった）。しかし、他の安全装置がはたらかない場合には、温度センサーの影響度が大きくなり、リスクの重要度も急激に高まった。つまり、我々は平常時のリスクの重要度しか考えていなかったことが問題であった。すでに何らかのトラブルが生じている非常時に特定されたリスクの重要度がどのように変化するか、というところまで検討しておくべきだったのではないかと考えている。

上述したとおり、リスクマネジメントだけでは全てのリスクに対処することはできないため、危機的事態が起きた場合のクライシスマネジメントも大変重要である。リスク発生から完全復旧まで、クライシスマネジメントは「初期対応」、「緊急復旧」、「定常復旧」の3つの段階に分けられると考えられる。交通事故を例に挙げるならば、「初期対応」は安全な場所へ負傷者を移動させ、救急車を呼び、胸部圧迫や人工呼吸を施すこと、「緊急復旧」は止血や外科的手術、「定常復旧」はその後の入院・通院治療に相当する。当たり前のことだが、一度起きた危機をなかったことにはできないし、「初期対応」「緊急復旧」を誤れば、「定常復旧」を経て完全復旧するまでの期間が長くなったり、最悪復旧できなくなったりする。重要なことは、「初期対応」「緊急復旧」の段階で、短時間で状況を的確に把握し、おこなうべき作業を適切に判断し、確実に実行することである。今回のトラブルでは、PC破損後、我々の最重要ミッションであるヘリウムの液化・供給を途絶えさせないために、操作盤を直接操作することでの液化運転を検討し、操作盤のマニュアルの作成を業者殿に依頼した（「初期対応」に対応する。）ところまでは良かった。しかし、液化運転時に冷却水のポンプ類の操作を誤った（「緊急復旧」に対応する。）ことが、被害を拡大させ、完全復旧に長期間を要することになった要因であると考えている。

6. まとめ

計画停電の際の液化機制御用 PC の破損から始まった一連のトラブルの経過と復旧作業について報告した。今回の一連のトラブルから、日常的なメンテナンス、非常時に被害を拡大させないための冷静で柔軟な対応、今後の液化設備の保全と更新を検討することの重要性を再認識した。また、今回のトラブルを危機管理の観点から考察した。

謝辞

今回のトラブルに関して適切な助言および有効なサポートをして頂いた、京都大学環境安全保健機構低温物質管理部門の先生方およびスタッフの方々に心より感謝いたします。年末から発生したトラブルに対して年度末までお忙しい時期にも関わらず対応をして頂いた、大陽日酸株式会社のご担当者様にも感謝いたします。