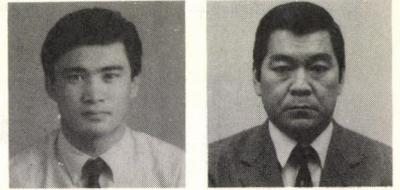


[展望・解説]

BWR原子力発電所における ターボ冷凍機の使用例



平 耕一* 桑田 弘**

1. はじめに

原子力発電所において、ターボ冷凍機は発電所内各建屋の換気空調系へ冷房用の冷水を供給するシステムに用いられている。本稿では最近のBWR原子力発電所を例にとり、ターボ冷凍機を用いた冷水系システムの概要と、そこで用いられているターボ冷凍機の特徴について述べる。

原子力発電所は、図1に示すように原子炉建屋、タービン建屋、サービス建屋など、いくつかの建屋により構成されている。各建屋はさらにいくつかのエリアに区分され、例えば原子炉建屋は、その中心に原子炉格納容器を有する原子炉棟と、原子炉棟を囲む付属棟に分けられる。付属棟は、さらに中央制御室、非常用電気品区域、廃棄物処理区域等に区分されている。

原子力発電所の換気空調系は、これらのエリアを放射能の有無、室内の要求温度条件、使用目的などから、いくつかのサブシステムに分けて構成している。

換気空調系の機器へ冷水を供給する冷水系についても、プラントの運転条件、換気空調系の使用条件によってプラント通常時（プラント運転時、定期点検時）に運転する常用冷水系と、プラント非常時にも運転を要求される常・非常用冷水系から構成される。

原子力発電所は年1回の定期検査のときには発電を停止するが、換気空調系はプラント停止時といえども運転を停止することがないため、冷水系についても運転継続が要求される。従って冷水系の系統構成、機器の選定においては、十分な信頼性が考慮されなければならない。

2. 冷水系のシステム概要

2-1 常用冷水系

プラントの通常運転時、停止時（プラント定期点検時）を通して運転が必要な、常用換気空調系-原子炉棟、タービン建屋、廃棄物処理区域等の換気空調系へ冷水を供給する。

本系統はターボ冷凍機、ポンプ、サージタンク、防食剤添加タンク、配管、弁、電気・計装品よりなる。ターボ冷凍機の冷却水には海水を最終のヒートシンクとした、常用の補機冷却水系を用いている。

系統概念図を図2に示す。

冷凍機は複数台設置し、1台を予備機とした状態で、プラント運転時の最大負荷が処理できるよう容量、台数を選定する。

予備機は、運転中の冷凍機、ポンプがトリップした際に、自動的に起動するようインタロックを組んでいる。

プラント停止時には、発電所内各所で機器の分解点検等の作業が行なわれるため、所内の環境を作業に適した状態に保つべく、予備機も含め全台で運転が可能となる構成となっている。

放射線管理区域の換気系は一般に再循環運転を行わないため、本系の負荷の大部分は外気を冷却するために使われている。

季節変化に伴う負荷変動に対しては、冷水の戻り温度検出による冷凍機の台数制御で対応している。また、ターボ冷凍機単体では、冷凍機出口冷水温度を一定に保つよう容量を制御している。

本系統のターボ冷凍機の仕様(例)を表1に示す。

2-2 常・非常用冷水系

プラントの通常時、非常時を通じて運転が要求される中央制御室、非常用電気品区域の換気空調系へ冷水

* 関東芝 原子力事業部

** 石川島播磨重工業(株) 汎用機械事業部

原稿受付日 平成元年3月7日

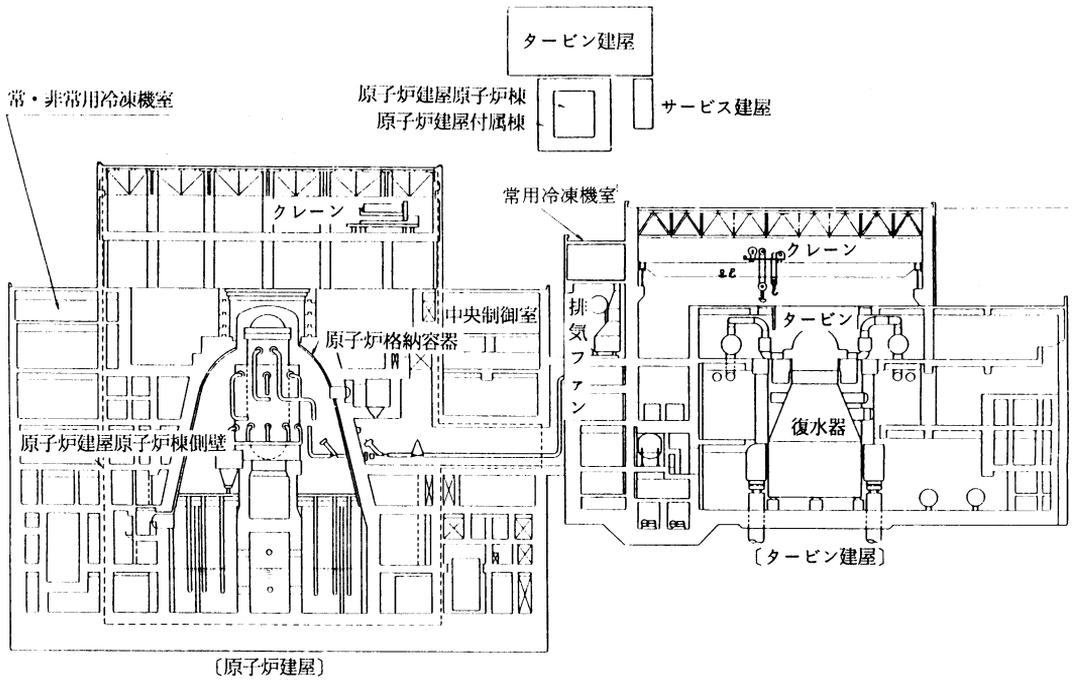


図1 原子力発電所建屋配置図および断面図(例)

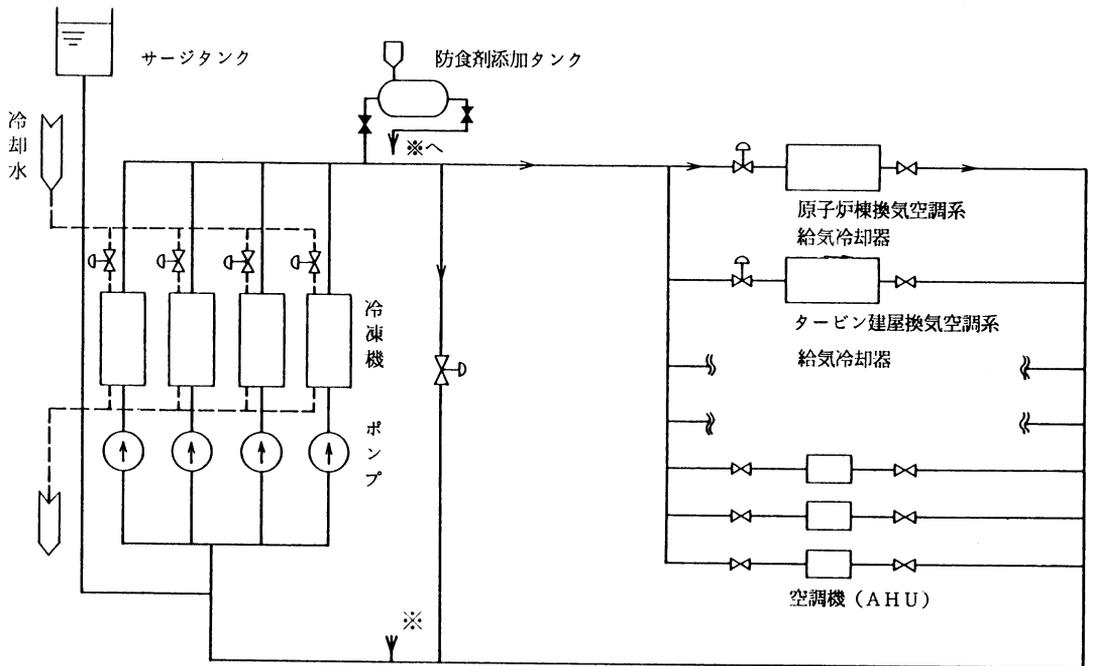


図2 常用冷水系概念図(例)

表1 冷凍機主要仕様(例)

要 項	常用冷凍機	常・非常用冷凍機	
		A系	B系
型 式	単段密閉式 ターボ冷凍機	同 左	同 左
流 体	水	水	水
容 量 USRT	700	140	140
冷水 条件	入口温度 °C	17	12
	出口温度 °C	7	7
冷却水 条件	入口温度 °C	35	35
	出口温度 °C	42	40

を供給する。

中央制御室換気空調系は、発電所の運転・制御の中枢部にあたる中央制御室及び電子計算機室の空調を行うものでありプラントが非常状態にあっても、所定の室内環境条件を満足するものでなければならない。この系統は、100%容量のファン及び冷却設備を2系統有している。

常・非常用の換気空調系へ冷水を供給する冷水系も独立した2系統よりなり、それぞれ冷凍機、ポンプ、配管等から構成されている。

ターボ冷凍機の冷却水には、海水を最終ヒートシンクとした、常・非常用の補機冷却水系が用いられる。系統概念図を図3に示す。冷凍機の外観写真を図4に示す。

本系の機器はすべて非常用電源に接続されており、万一の原子炉事故、常用電源喪失時においても運転は継続される。また、発電所立地点において想定されるいかなる地震に際しても系統の機能を維持できるように耐震設計が行われている。

系統の容量制御は、常用系同様冷水戻り温度信号による冷凍機台数の制御と冷凍機単体の容量制御によって行っている。

本系統のターボ冷凍機の仕様(例)を表1に示す。

3. 冷水系ターボ冷凍機の特徴

3-1 機器仕様上の特徴

原子力仕様品は、原則として冷凍機個々の構成部品(電動機、電気計装品、弁類、本体及び配管材質等)についても、発電所全体として統一のとれた標準仕様

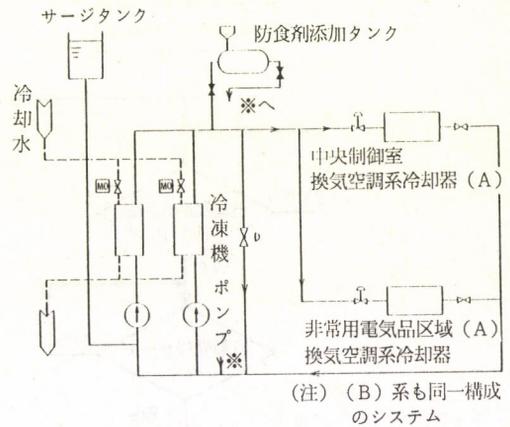


図3 常・非常用冷水系(A)系概念図(例)

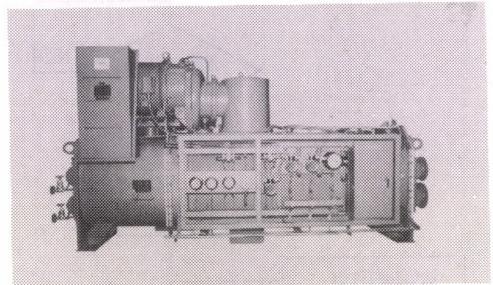


図4 常・非常用冷凍機・外観

書にもとづき製造・検査されたものを用いている。また、サクシオンベーン駆動機構シールの二重化、油ヒータ及び油ストレーナに予備を設ける等により信頼性向上と機能保持を計り、連続運転に支障のないようにしている。

3-2 運転制御上の特徴

図5に冷凍機の起動・停止に関する概略フローチャートを示す。

以下に一般空調用と同一方法であるが、冷凍機独自の制御である容量制御方法と、原子力発電所用冷凍機の特徴であるローテーション運転、凝縮圧力制御について述べる。

3-2-1 容量制御

容量制御は、圧縮機吸込側に設けられたサクシオンベーンを開閉し、冷媒の吸入量を変え行っている。

更に低負荷には、蒸発器と凝縮器の接続配管の途中に設けられたホットガスバイパス弁を開閉し、圧縮機吐出冷媒(ホットガス)をバイパスすることにより行

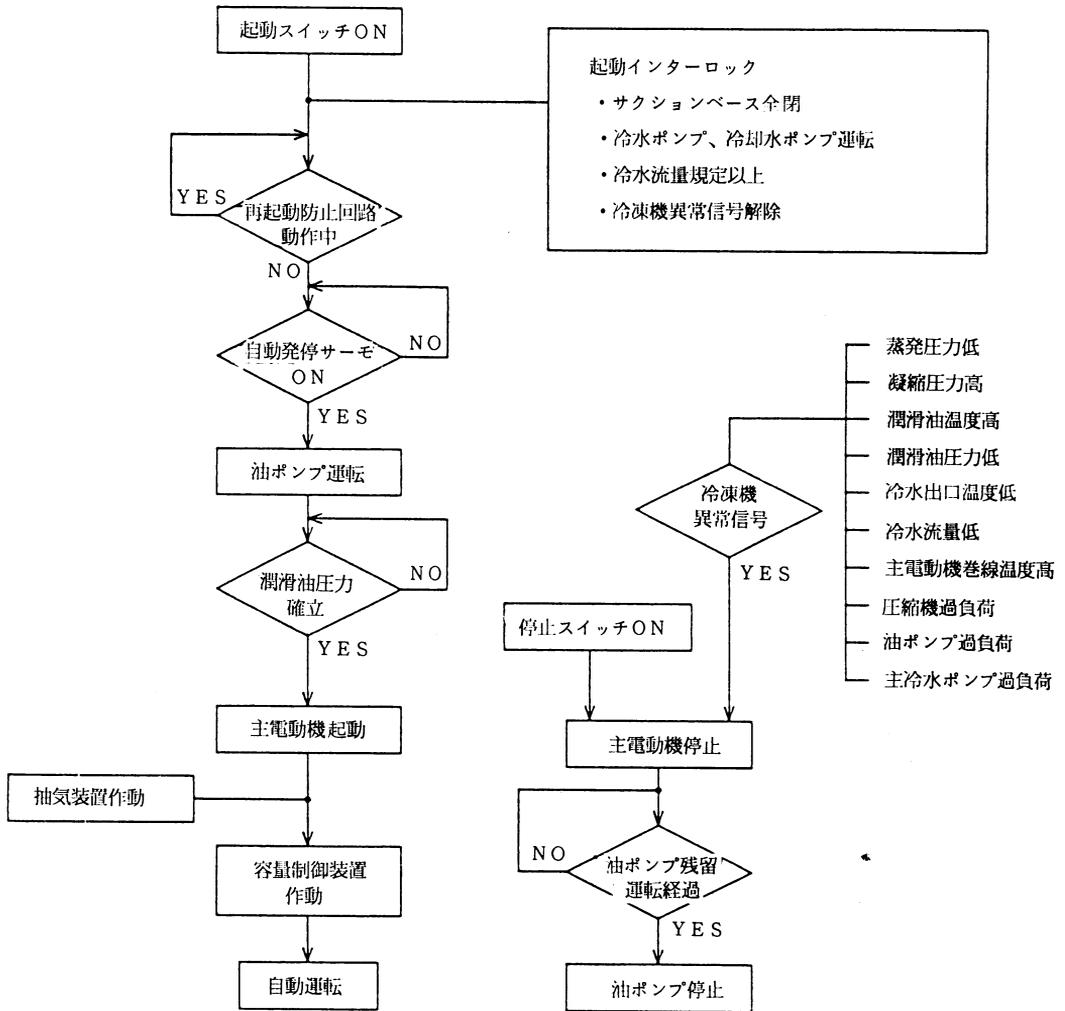


図5 冷凍機起動、停止フローチャート

なっている。

サクションベーン及びホットガスバイパス弁の制御は、冷水出口温度及び主電動機（圧縮機）電流値を検知し、温度電流調節計により行なわれる。

ここで、温度電流調節計は、冷水出口に取付けられた測温抵抗体と主電動機CT 2次電流との組合せにより具体的には以下の制御を行っている。

(1) 電流値が97%以下の時

冷水温度に応じてベーンは温度制御をする。ベーンが開くと主電動機の電流は増えるが、100%に達しないと電流制御は働かない。

負荷が軽くなりベーンが閉じてきて図6のゼロ設定

の位置にベーンが来ると、今度はホットガスバイパス弁が開き始め圧縮機のサージングを防止する。

(2) 電流値が100%になった時

冷水温度が高く、ベーンが開く必要があっても主電動機の過負荷を防止するためベーンは開かず停止している。冷水温度が低くなった時はベーンは閉じる方向に動く。

(3) 電流値が105%になった時

冷水温度に関係なく電流が100%になるまでベーンは閉じてゆき、電流を減らす。

3-2-2 ローテーション運転について

一般空調用冷凍機では予備機を有していないことが

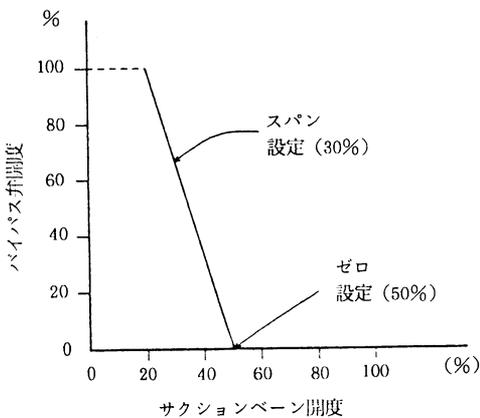


図6 サクションベーンとホットガスバイパス弁の相互動作 (例)

多いため、シーズン中は、自動発停をしながら連続で運転される。原子力発電所用冷凍機は例えば最大負荷時に3台運転され、更に1台の予備機をもたせるといった、容量と台数の選定を行なっている。この場合、負荷の少ない中間期、冬期には、1～2台の運転となるため、常時2～3週間のローテーションで運転号機の切替を行なっている。このため各号機の運転時間が標準化され、気密保持も容易となっている。

一方、ローテーションによってはかなりの期間停止することもあるため、起動時のフォーミング（潤滑油中に解け込んだ冷媒の蒸発に伴う泡立ち）による油圧低下や軸受油膜の冷媒による希釈等が懸念される。

これらの問題に対応すべく、潤滑油系統の設計には、充分な配慮を払っている。

3-2-3 凝縮圧力制御

ターボ冷凍機の密閉式主電動機の冷却には冷媒冷却方式が採用されている。冷却用冷媒は凝縮圧力と蒸発圧力の差圧によって主電動機に供給されるため、冷却冷媒量を十分に確保するためには冷却水の流量と温度によって定まる凝縮圧力を規定状態に保つ必要がある。一般空調用冷凍機では、冬期冷却水入口温度が低下した際には冷却水入口弁を手動で絞り凝縮圧力を維持しているのが通常である。これに対し原子力発電所では冷却水系側で温度制御をしているほか、冷凍機側でも凝縮圧力を検出し、冷却水量を調節できるよう自動調節弁を設けている。

図7に制御システムを示す。

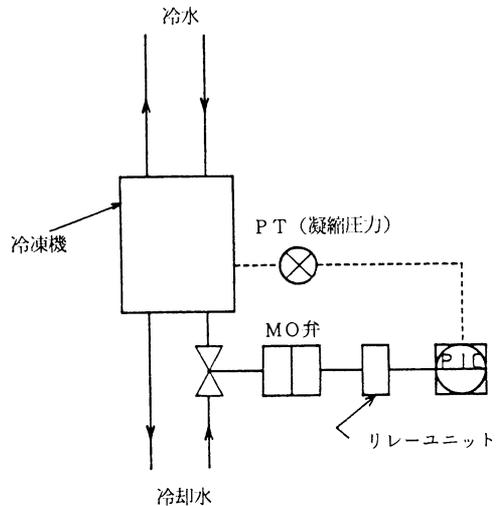


図7 凝縮圧力制御システム (例)

3-3 耐震性の確認

原子力発電所内の各系統、機器類は地震によりそれらに損傷が起きた際、発生する可能性のある放射線による環境への影響の観点から耐震の重要度分類を行い、それぞれに適切な耐震設計がなされている。

ターボ冷凍機は直接、放射性物質を扱うものではないが、発電所の安全性確保のため充分な配慮がなされている。

以下に常非常用冷凍機開発時の耐震性評価・確認方法について述べる。

(1) 圧縮機ユニット

常非常用冷凍機に使用するものと同一クラスの汎用ターボ圧縮機電動機ユニットを加振台上に設置し、定格運転状態で人工地震波を含む各種地震波、サイン波を入力した。圧縮機各部の加速度、回転軸の変位、羽根車とケーシングの接触並びに回転数の変動を測定した結果、いずれの項目も問題なく、圧縮機ユニットについては、汎用のもので十分な剛性を有し、地震時機能維持を図れることを確認した。

(2) 熱交換器

圧縮機ユニット、熱交換器部全体系の固有値解析及び、人工地震波による応答解析を実施した。

ターボ冷凍器のFEMモデルを図8に示す。

解析の結果、汎用の冷凍機に対し、熱交換器部材の一部、アンカボルトサイズ等を変更することにより必要な剛性を有することを確認した。また、このとき

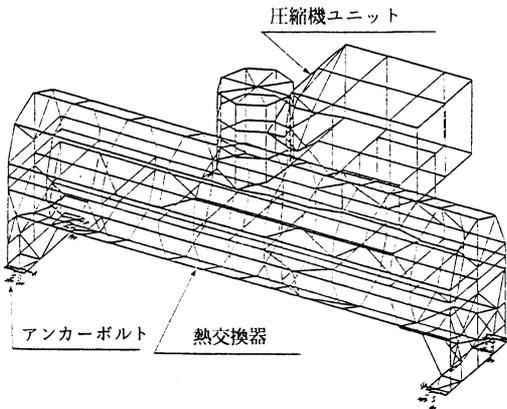


図8 ターボ冷凍機のFEMモデル

の冷凍機各部に発生する応力も十分に低いものとなっている。

(3) 電気・計装機器

電気・計装品は単体にて耐震試験を実施し、型式認定されたものを用いている。また、機側ラック、制御

盤に取り付けた状態でも打振試験を行ない、剛性の確認を行なっている。

4. まとめ

ターボ冷凍機は発電所内各種機器が正常な運転を行なうための雰囲気温度維持、並びに発電所運転員、作業員のための居住性、環境維持のためにかかせない重要な機器である。

これまで冷凍機の機器仕様、運転制御方法は一般汎用の冷凍機をもとに系統機能上の要求に加え、原子力発電所で使用する上での信頼性を確保すべく各種の改良を行なってきた。

今後とも、これらの冷凍機の運転実績を継続的にフォローし、より信頼性が高く、使い易いものとして行く必要がある。

本稿が原子力発電所用ターボ冷凍機の理解の一助となれば幸いである。

ターボ機械協会入会について

ターボ機械協会特別会員、個人会員入会希望の方は事務局に入会申込用紙が用意してありますのでご連絡下さい。なお入会金、会費については入会時期により下記のようになっております。

・会費ならびに入会金(年額)

	入会金	会費
特別会費	10,000円	30,000円 / 1口 (年間購読料含む)
個人会費	1,000円	7,200円 (年間購読料含む)

・入会時の会費払込金額

申込月	特別会費	個人会費
4月～6月(第1四半期)	30,000円 / 1口	7,200円
7月～9月(第2四半期)	22,500円 / 1口	5,400円
10月～12月(第3四半期)	15,000円 / 1口	3,600円
1月～3月(第4四半期)	7,500円 / 1口	9,000円*

*個人会員に限り第4四半期入会の場合は次年度分を加え徴収する。