



Title	信頼性の要因分析とシステム構成の提案 : コージェネレーションシステムを用いた空調システムの信頼性評価法に関する研究 その2
Author(s)	羽山, 広文; Hayama, Hirofumi; 阿南, 陽介 他
Citation	日本建築学会環境系論文集, 584, 53-59
Issue Date	2004-10-30
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/50476">https://hdl.handle.net/2115/50476</a>
Rights	日本建築学会、本文データは学協会の許諾に基づきCiNiiから複製したものである
Type	journal article
File Information	AIJ.584.53-59.pdf



## 信頼性の要因分析とシステム構成の提案

コージェネレーションシステムを用いた空調システムの信頼性評価法に関する研究 その2

## ATTRIBUTION ANALYSIS OF RELIABILITY AND PROPOSAL OF SYSTEMS

Reliability evaluation method for air-conditioning systems with co-generation system Part 2

羽山 広文\*1, 阿南 陽介\*2, 渡邊 均\*3, 林 正博\*3  
絵内 正道\*4, 森 太郎\*5Hirofumi HAYAMA, Yosuke ANAMI, Hitoshi WATANABE,  
Masahiro HAYASHI, Masamichi ENAI and Taro MORI

Information systems play an important role in today's advanced information society. The concentration and performance of the information processing devices that make up these systems are increasingly rapidly, and this has led to an increase in the heat concentration of Data Centers as well. For this reason, air conditioning systems for Data Centers must offer a high level of reliability to constantly maintain appropriate room temperatures. In a previous report, we proposed a calculation method for evaluating the reliability of air conditioning systems - targeting central heat source A/C systems and distributed A/C systems as well as co-generation systems with complex system configurations - and examined the unique features of this calculation method. In this paper, we will use the previously proposed calculation method to conduct the following studies, targeting cases in which the systems have actually been implemented.

- 1) Study methods for evaluating reliability with consideration to change in the performance of air conditioners, and change in room temperature accompanying A/C system stoppages.
- 2) In an A/C system comprised of several A/C units, evaluate how the reliability characteristics of each individual air conditioner, and the number of devices that make up the system, affect the overall reliability of the system.
- 3) Evaluate how the individual units that make up a co-generation system affect the overall reliability of the system.

**Keywords :** Air-conditioning, Reliability, redundancy design, Unavailability

空気調和、信頼性、冗長設計、不稼働率

## 1. はじめに

情報システムは、今日の高度情報社会の中で重要な役割を果たしている。そのシステムを構成する情報処理機器は、高密度・高性能化が著しく、情報処理室の発熱密度は高くなっている。このため、情報処理室用の空調システムは、室内の温度を常に適正に維持する高い信頼性を要求されている。一方、エネルギー源のベストミックス、省エネルギーの観点で、情報処理室の空調システムにコージェネレーションシステム (CGS) を導入するなど、その構成が益々複雑化している。複雑化した空調システムの信頼性設計を能率的に行うには、システムを構成する機器が信頼性に及ぼす影響を定量的に把握しその知見を蓄積する必要がある。

既報<sup>1)</sup>では、中央熱源空調システムや分散空調システムだけでなく、システム構成が複雑なコージェネレーションシステムを対象に、空調システムの信頼性を評価する計算方法について提案し、その特性について検討した。本研究では、既報で提案した計算方法を用い、実際の導入ケースを対象に、以下の検討を行う。

- 1) 空調システムの停止にともなう室温変化、空調機の能力変化を考慮した信頼性評価方法を検討する。
- 2) 室内に設置される空調機の構成が空調システム全体の信頼性に

与える影響を評価する。

- 3) コージェネレーションシステムを構成する各種機器がシステム全体の信頼性に与える影響を評価する。

## 2. 対象システム

対象とするシステム構成の一例を図1<sup>1)</sup>に示す。既報<sup>1)</sup>と重複した説明になるが、論文の独立性を考慮し説明する。本論文で扱うシステムは、AHU (Air Handling Unit) 及びPAC (Packaged Air Conditioner) の2種類の空調機と、これらが稼働するためのエネルギーを供給する部分とからなる。ここで、AHUとPACは稼働するためのエネルギーの種類が異なっており、AHUは冷凍機 (以後REF) から冷水の供給を受けて稼働し、PACは商用電力 (以後CS) により稼働する。AHUに冷水を供給する部分は、都市ガス (以後TG) を受ける燃料部分、ガスを燃料に発電とともに排熱を供給する発電機 (以後GE) 部分、排熱を冷水に変換するREF部分の系列より成る。また、PACへの電力供給は、通常時はCSとGEからの電力が、適当な配分比率の下に供給される。また、CS停止時には必要に応じてGEとは別に設けられた予備発電機 (以後GT:ディーゼルエンジン発電機) から電力供給を受ける。さらに、本論文の対象外

\*1 北海道大学大学院工学研究科 助教授・博士(工学)

\*2 鹿島建設 修士(工学)

\*3 NTTサービスインテグレーション基盤研究所 博士(工学)

\*4 北海道大学大学院工学研究科 教授・工博

\*5 釧路工業高等専門学校 助教授・博士(工学)

Assoc. Prof., Graduate School of Engineering, Hokkaido University, Dr. Eng.

Kajima Co., M. Eng.

NTT Service Integration Laboratories, Dr. Eng.

Prof., Graduate School of Engineering, Hokkaido University, Dr. Eng.

Assoc. Prof., Kushiro National College of Technology, Dr. Eng.

であるが、GEからの電力はPACだけではなく、通信機へも供給される。各部における動作と予備装置の役割、及び信頼性を考えるうえで考慮すべき事項は以下である。

2.1 燃料部分

通常時、ガスエンジンで駆動するGEおよび冷水を発生するREFはTGを配管により供給されることを想定する。これらの機器はTG停止時に備えて、LPガス（以後LPG）を保持しておくケースがある。これらは、GEの燃料として供給される。その供給能力は、当然全GEの所要量に対し、何時間分かを単位として表現される。

2.2 発電機（GE）部分

GEはガスを燃料に発電を行ない、電力はPACに供給され、生じる排熱はREF部分に供給される。GEの停止に備えてバーナが設置されることもある。バーナには発電能力はないが、REFへ熱供給ができる。電力部分との関連は、GEによって電力と廃熱を一括して生産する方がコストが低いので、できる限りGEの発電容量を大きくしたい。しかし、GEのみに依存することは信頼性の面で不安があるため、CS部分にてバックアップするという構図になっている。

本システムの信頼性は、システムの構成要素であるGE・GT等の信頼性だけでなく、それら1個ずつまたは全体としての電力供給能力に大きく影響される。これらは経済性を大きく左右する要因でもある。

2.3 冷凍機（REF）部分

REFは、GE・GT等から供給される排熱を利用して冷水を発生させる。GE・GTが故障などで停止した場合、バーナーから熱供給できることとする。発生した冷水はAHU部分へ供給される。REFの台数は一般には複数である。

2.4 空調機（AHU・PAC）部分

AHUはREF部分から供給される冷水を受けて、また、PACは電力によって動作し、対象の室内を冷却する。これら空調機は回転機器を有するため、機器単体で高い信頼性を確保するには限界がある。そこで、信頼性向上のため、空調機も一般に複数台設置される。故障により停止するAHUおよびREFの台数が多くなるほど冷却能力は低下し、室温が許容値を超えるまでの時間は短くなる。

一方、一般的な空調設備設計において、空調機の冷却能力は定格能力を用いることが多い。しかし、一部の空調機が故障した場合、室温は定格能力を定めた温度より高くなり、温度上昇に伴い空調機

の冷却能力は上がる。そのため、信頼性の検討では温度条件と空調機の冷却能力の関係を考慮することにより、空調機の予備機台数が削除できることもある。

REFおよびAHUの能力と個数は、信頼性とコストに関連する大きな要因である。AHUのトータル冷却能力に余裕を持たせAHU数を多くすれば、一部のAHU故障の際にも室温上昇速度を小さくすることができる。これらは、システム構成上の重要な決定事項である。

2.5 電力部分

通常時はCSを受電しPACに供給する。CSが停止すると、他系統のCSからの受電に切り替わる。いずれのCSも、容量は全てのPACを稼働させるのに必要な量をまかなえる。CSが全て停止したときは、GTが稼働する。

2.6 PAC部分

電力によって動作する点を除き、AHU部分と同様である。

2.7 空調気流方式

一般に、高発熱の機器が設置される情報処理室では、室内の発熱密度が高い。情報処理機器の適正な冷却には、二重床吹出しの空調気流方式を用いることが多い<sup>2)</sup>。この方式は、二重床内をチャンパーに利用していることから、一部の空調機が故障により停止しても、空調給気の供給が滞ることがなく、直ちには、空調システムのダウンとは結びつかない。

3. 評価方法

一般に信頼性設計で用いる不稼働率は、平均修理時間 / (平均故障間隔 + 平均修理時間) で定義される。これは運転時間に対するシステムが停止している時間の比を意味している。空調システムが正常な場合、室内に設置された機器の発熱、外壁の貫流熱による負荷は空調機により除去され、室温は設定温度付近に維持される。しかし、空調機が停止すると、室温は時刻の経過とともに上昇する。空調システムの信頼性評価では、単に空調システムが不稼働になった場合を扱うのではなく、室温が許容温度を超過した時点で空調システムが停止したと認識することが妥当といえる。

ここでは、前項に示した機器の特性に従い、信頼性評価を行う。解析理論および解析方法の詳細は、既報<sup>1)</sup>で述べられている。ここでは、その概要を示す。

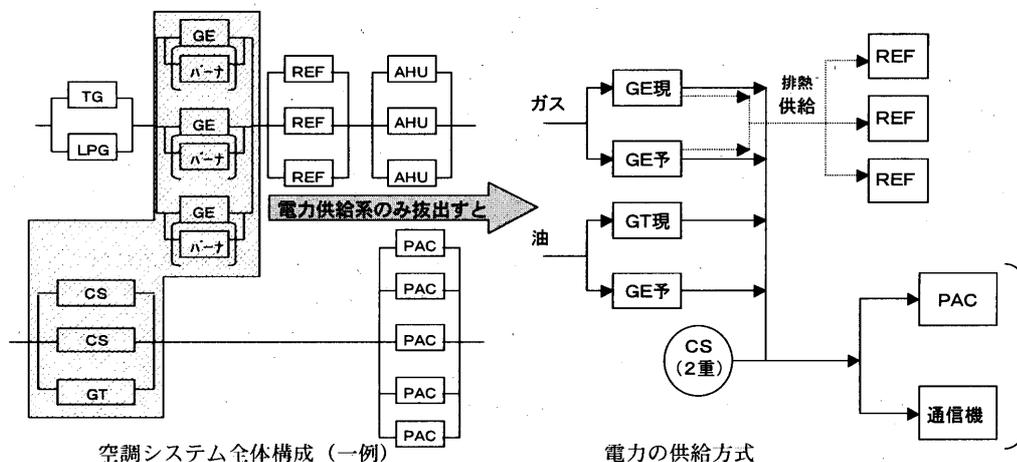


図1 解析対象システム（一例）<sup>1)</sup>

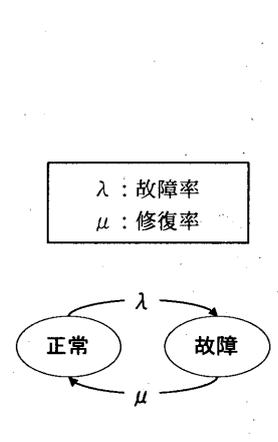


図2 単純マルコフ過程

### 3.1 解析理論

空調システムを構成する要素それぞれの故障率を一定とし、さらに修理時間が指数分布に従うこととすると、システム全体の故障・修理の過程は単純マルコフ過程となる。単純マルコフ過程とは、1つ前の状態が決まれば、次の状態への遷移が、それ以前の過去の状態及び1つ前の状態での経過時間に無関係に確率的に決まるような確率過程のことをいう。例えば単一ユニットの場合は図2のようになる。システムは有限個の状態で記述され、それら状態間で一定の遷移率で遷移が繰り返される。例を示すと、CS1台・GT1台・PAC3台で構成されるシステムの場合、図3のように表現される。

ここで、各状態で稼働している空調機の数を決まっているので、その状態における室温が許容値を超過するまでの時間も定まる。そこで、各状態に遷移してからの時間と室温が許容値を超過するまでの時間を比較し、状態が許容時間を超過している部分のみをシステム不稼働状態としての不稼働率を積算することで、システム信頼性評価を行う。

### 3.2 許容時間のモデル化

空調機が故障、もしくは他の機器の故障により空調機が動作しなくなった場合、室温は次第に上昇する。室温が、機器の動作に支障の出ないとされる室温の許容値に達する時間のモデル化を考える。室の単位面積あたりの総熱貫流率を  $W$  [W/m<sup>2</sup>K]、室の熱容量を  $Q$  [Wh/m<sup>2</sup>K]、室への熱供給を  $H$  [W/m<sup>2</sup>]、外気温を  $\theta_0$  [°C]、室温  $\theta(t)$  [°C] とするとき、外壁の熱容量を無視すると次式の熱平衡式が立つ。

$$Q \frac{d\theta(t)}{dt} + W(\theta(t) - \theta_0) = H \quad (1)$$

これを解くと以下となる ( $C$  は定数)。

$$\theta(t) = \exp\left(-\frac{W}{Q}t\right) \left\{ \frac{H + W\theta_0}{W} \exp\left(\frac{W}{Q}t\right) + C \right\} \quad (2)$$

また、 $t=0$  のときの室温  $\theta(0) = \theta_c$  とすると、 $C = \theta_c - (H + W\theta_0)/W$  となり、 $t$  について整理すると以下となる。

$$t = -\frac{Q}{W} \ln \left[ \frac{W\{\theta(t) - \theta_0\} - H}{W\{\theta_c - \theta_0\} - H} \right] \quad (3)$$

$\theta_0$  [°C] =  $\theta_c$  [°C]、時刻  $t$  [h] までの温度変化  $\Delta T = \theta(t) - \theta_c$  とすると、次のように簡単に表すことができる。

$$t = -\frac{Q}{W} \ln \left( 1 - \frac{\Delta T W}{H} \right) \quad (4)$$

今回検討するシステムでは、許容できる温度変化  $\Delta T$  [°C] は与え

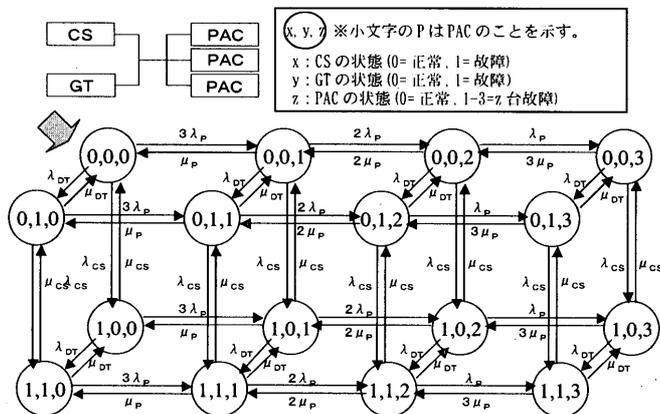


図3 システム解析モデル (一例)

られ、発熱量  $H$  [W/m<sup>2</sup>] の部分は、発熱機器の出す発熱量  $H_m$  [W/m<sup>2</sup>] から空調機で冷却熱量を差し引き (0 以下の場合 0 とする) 求められる。発熱量  $H$  [W/m<sup>2</sup>] は、稼働している空調機台数に依存して変動するため、稼働 AHU 数を  $N_{AHU}$  [台]、稼働 PAC 数を  $N_{PAC}$  [台]、AHU の冷却能力を  $H_{AHU}$  [W]、PAC の冷却能力を  $H_{PAC}$  [W]、床面積を  $A$  [m<sup>2</sup>] とすると、発熱量  $H$  [W/m<sup>2</sup>] は次式のように表される。

$$H = H_m - \frac{N_{AHU} \cdot H_{AHU} + N_{PAC} \cdot H_{PAC}}{A} \quad (5)$$

### 3.3 解析方法

解析には、システムを構成する各機器の故障率と平均故障時間のほか、故障規模 (同時に停止する空調機台数) 毎に、3.2 節に示す方法から得られた室温の許容時間 (室温が許容値を超過するまでの時間) を入力し、前報<sup>1)</sup>に示した信頼性評価手法を用い、システム全体の不稼働率を求める。

### 4. 空調機 (PAC) を用いた空調システムの信頼性評価

信頼性設計における信頼性評価の役割は、システム構成を変えたときの信頼性比較という直接的なもの他に、故障率等の信頼性パラメータが不明確な状況における判断の一助とするため、各パラメータを変化させ、その影響を評価することも重要である。これらの観点から電源系システムのみで構成された PAC を用いた空調システムの信頼性について検討する。図4にシステムの例を示す。ここでは、この目的を達成すべく、故障率等の値を適宜想定して解析を行った。具体的には表1の如くである。

空調機 (PAC、AHU) および冷凍機 (REF) は、松浦ら<sup>2)</sup> が故障の記録から得た故障率・平均修理時間を基に設定した。これ以外の機器および商用電源、都市ガスの故障時間・平均修理時間に関しては、一般に公開された信頼度データがない。このため、各装置の故障率・平均修理時間および建物の熱的条件を以下のように想定をした。

- 1) 発電機 (GE) など機械的な部分を含む装置は、一般に故障率が高いので  $10^{-1}$  (1年に1回程度) の故障率を、また REF と同程度の平均修理時間を設定した。
- 2) 都市ガス (TG) のような極めて故障しにくいと思われるものについては、 $10^{-10}$  の故障率とし、ひとたび停止した場合には復旧するまで長時間を要することから、 $10^2$  [h] のオーダーの平均修

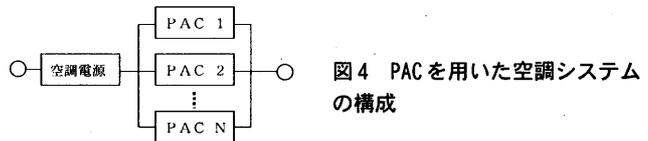


図4 PACを用いた空調システムの構成

表1 計算条件

床面積	: 780 [m <sup>2</sup> ]	CS 平均修理時間	: 1 [h]
総発熱量	: 234 [kW]	TG 故障率	: $1 \times 10^{-10}$
空調機の冷却能力	: 40 [kW/台]	TG 平均修理時間	: 170 [h]
許容温度上昇	: 13 [°C]	PAC 故障率	: $1 \times 10^{-1}$
熱容量	: 30 [Wh/m <sup>2</sup> C]	PAC 平均修理時間	: 50 [h]
室内の発熱密度	: 300 [W/m <sup>2</sup> ]	AHU 故障率	: $1 \times 10^{-5}$
REF 故障率	: $2 \times 10^{-1}$	AHU 平均修理時間	: 50 [h]
REF 平均修理時間	: 30 [h]	バーナ故障率	: 0
GE 故障率	: $2 \times 10^{-4}$	バーナ修理時間	: 0
GE 平均修理時間	: 30 [h]	基準室温	: 27 [°C]
CS 故障率	: $4 \times 10^{-7}$	基準外気温	: 32 [°C]
室温による冷却能力の変化係数 ( $C_1$ )	: 750 [W/°C]		
外気温による冷却能力の変化係数 ( $C_0$ )	: 285 [W/°C]		
外気温	: 年平均外気温 (東京)		

理時間を想定した。

- 3) 空調電源 (CS) は機械的な部分を含む装置と、都市ガスのように滅多に供給停止しない装置との中間的な故障率として  $10^{-7}$  のオーダーとし、停止後速やかに復旧することを想定し、平均修理時間として  $10^0$  (1) [h] のオーダーとした。
- 4) 許容温度上昇は  $27^{\circ}\text{C}$  から  $40^{\circ}\text{C}$  までの  $13^{\circ}\text{C}$  を想定した。これは室内に設置される機器の許容温度に依存するものであるが、多くの電子機器における動作保証の許容温度を鑑みると、妥当な範囲と考えられる。
- 5) 室内の熱容量は、RC 造の建物において室内に機器を設置した場合の値を想定した。
- 6) PAC の特性のうち、室温および外気温による冷却能力の変化係数は文献 3) のメーカー資料から求めた。

#### 4.1 温度による空調機冷却能力の変化

空調機の冷却能力は、空調すべき室の温度、外気温度により変化する。一般的に室温が高く、外気温が低くなるにつれて冷却能力が増加する。ここでは、室温及び外気温による空調機の冷却能力変化が空調システムの信頼性に与える影響を検討する。なお、この空調機の冷却能力は室温及び外気温と必ずしも比例関係ではないが、取り扱いの簡便化のため空調機の冷却能力を各温度の一次関数で表し、信頼性の評価に用いる。空調機の冷却能力  $H_{PAC}$  [W] は次式で示すことができる<sup>1)</sup>。各変数は空調機の定格冷却能力  $H_{BA}$  [W]、室温による冷却能力の変化係数  $C_r$  [W/°C]、外気温による冷却能力の変化係数  $C_o$  [W/°C]、基準室温  $\theta_{Br}$  [°C]、基準外気温  $\theta_{Bo}$  [°C] とする。

$$H_{PAC} = H_{BA} - C_r(\theta_r - \theta_{Br}) - C_o(\theta_o - \theta_{Bo}) \quad (6)$$

空調機台数と不稼働率の関係を図 5 に示す。この結果、双方とも空調機台数を増やすと不稼働率の値は低下し、最終的に不稼働率は電源の信頼性に収束する。今回検討した計算条件の場合、空調機台数が 1 台増加すると不稼働率の値は約  $10^{-2}$  低下する。

一方、空調機的能力変化を考慮することにより、同じ空調機台数であっても不稼働率の値は  $10^{-2}$  ほど低下する。このことは、同一の信頼性を少ない空調機台数で実現できることとなり、空調システムの建設費削減が可能となる。今回検討した計算条件において、5 台以上の空調機が設置される場合、空調機を 1 台少なく設置しても同程度の不稼働率となり、約 20% 程度の空調機台数の削減が可能となる。温度による空調機的能力変化は空調システムの信頼性評価にあたり、無視できない項目といえる。

#### 4.2 許容温度上昇

空調機の停止から機器の許容する温度までの差が大きほど許容

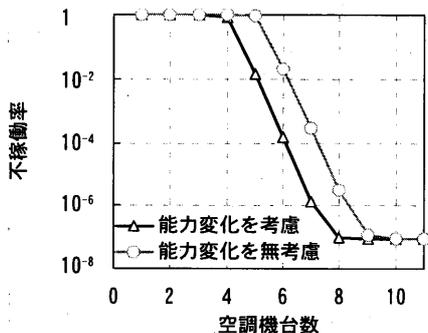


図 5 空調機の冷却能力変化を考慮した場合のシステム不稼働率

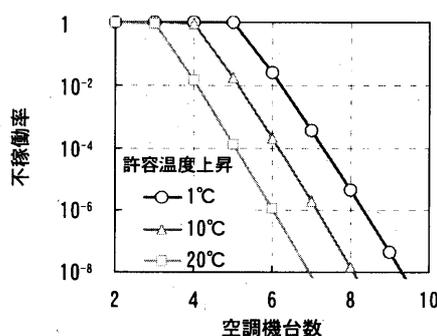


図 6 許容温度上昇を変化させた場合のシステム不稼働率

時間は拡大する。ここでは、許容温度上昇の拡大が空調システムの信頼性に与える影響を検討する。許容温度上昇をパラメータに、空調機台数と不稼働率の関係を図 6 に示す。この結果、許容温度を拡大すると、空調機台数に対する不稼働率の変化の割合は変わらないが、 $10^{\circ}\text{C}$  許容温度上昇を拡大すると不稼働率は約  $10^{-2}$  低下する。このことは、先に示した温度による空調機的能力変化と同様に、同一の信頼性を少ない空調機台数で実現できることとなり、空調システムの建設費削減が可能となる。今回検討した計算条件において、5 台以上の空調機が設置される場合、許容温度上昇を  $10^{\circ}\text{C}$  拡大すると空調機を 1 台少なく設置しても同程度の不稼働率となり、約 20% 程度の空調機台数の削減が可能となる。

許容温度上昇を拡大するためには、高温に強い機器の開発、室温の均一化等が考えられる。高温に強い機器の開発は機器のコストに直接関わる問題であり、容易に実現できることではない。しかし、室内温度の均一化は、空調システムの問題として工夫の余地が残されており、信頼性を確保した上で経済的空調システムの実現に向け検討すべき項目といえる。

#### 4.3 空調機の台数と冷却能力

空調システムの設計にあたり、1 台あたり空調機の冷却能力と台数の決定は重要な課題である。一般に 1 台あたりの冷却能力を大きくし、空調機台数を少なくする方が建設費が安価になると考えられる。しかし、予備機の比率が高くなり、必ずしも安価になるとは限らない。ここでは、目標とする空調システムの不稼働率をパラメータに、室内の総発熱量に対する空調機 1 台の冷却能力の割合と、総発熱量に対する総空調能力の割合について求めた。なお、空調システムの不稼働率の範囲は、一般的に情報処理室用空調システムに求められる範囲 ( $10^{-1} \sim 10^{-7}$ ) を想定した。図 7 に示す結果から、要求する不稼働率が大きな場合、空調機構成による必要空調容量の変化はほとんどない。しかし、要求する不稼働率が小さな場合、小型の空調機を多数設置した方が総空調機容量を大幅に縮小できる。

#### 4.4 平均修理時間

PAC の平均修理時間は、今回の計算条件では  $50$  [h]<sup>2)</sup> を想定しているが、修理方法、修理のための物流システムなどの工夫により、平均修理時間は短縮可能と考えられる。ここでは、PAC の平均修理時間が空調システムの信頼性に与える影響を把握するため、PAC の平均修理時間と空調システムの不稼働率の関係について検討する。

PAC 台数ごとの平均修理時間と不稼働率の関係を図 8 に示す。なお、それぞれの PAC 台数を現用機 + 予備機 1 台とし、また、電源は故障しないとしている。この結果、平均修理時間が小さくなると

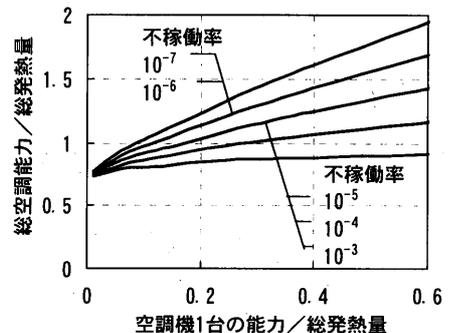


図 7 空調機 1 台の能力と総空調機能力の関係

不稼働率は加速度的に減少する。その傾向はシステムを構成する空調機台数が増えることにより顕著となる。このことは、システムを構成する機器の平均修理時間を減少することは、システムの信頼性向上に大きく寄与することといえる。

#### 4.5 故障率

機器の故障率は経験的に得られたパラメータであって、明確な値を知ることは難しい。つまり、設計に当たり設定した故障率と実際の値との乖離があった場合、システムの不稼働率に与える影響を把握することが重要である。ここでは、PACとCSの故障率がシステムの不稼働率に与える影響を検討する。

システムのPAC台数6台（現用機6台+予備機0台）と9台（現用機6台+予備機3台）の2パターンを想定し、PACの故障率とシステムの不稼働率の関係を図9、図10に示す。この結果、PACおよびCSの故障率の低下にともない、システム不稼働率が減少する。その傾向はPAC台数が6台より9台の方が顕著である。これは、複数台の機器で構成されたシステムの場合、システム構成台数の多い機器の故障率を低下させる方がシステム不稼働率の減少に貢献することを意味している。

一方、双方の結果から、システム不稼働率はある一定の値に漸近する。これは、直列に構成されたシステムにおいて、システム不稼働率は故障率の高い機器により決定されたためである。このことから、図9および図10に示す基準にした故障率（○印）で見ると、PACが6台のシステムであれば、CSの故障率を下げるよりもPACの故障率を低下させることの方が、また同様にPACが9台のシステムであれば、CSの故障率を下げることの方がシステム不稼働率の減少に貢献する。

以上のことから、直列で構成されたシステムの場合、構成される機器の台数により機器の故障率がシステム不稼働率に与える影響が異なる。このため、システムの設計にあたり、現在我々が認知して

いる故障率の前後の値において、システム不稼働率に与える影響を把握することは非常に重要なことといえる。

#### 5. 熱源系空調機を含んだ空調システムの信頼性評価

近年電力需要の平準化、エネルギー利用効率の向上を目的にCGSの導入が進んでいる。このシステムは、多数の機器で構成されるため、PACのみを利用するより信頼性の確保が困難といわれている。特にGE、REFは機器の特性から単体の信頼性が低く、予備機、又は複数の機器で構成されなければ必要な信頼性を確保するのは難しい。省エネルギー、省コストを考えると、できるだけ熱源系空調機の容量を大きくとることが目標となるが、信頼性の観点で制約を受ける。ここでは、図11に示す電源系の空調システムと熱源系空調機を併設したシステムを扱う。また、原則として表2に示す計算条件を採用し、CGSの排熱を利用した空調システムに関し、その構成パターンや容量とシステム不稼働率の関係に焦点を絞り検討する。

##### 5.1 発電機（GE）・冷凍機（REF）

GEとREFは、多くの場合、複数台設置され、互いに同じ台数が用意される。そこで、表2に示す条件の場合、空調機の冷却能力が

表2 熱源系空調機を含んだシステムの検討条件

床面積	: 1500 [m <sup>2</sup> ]	CS平均修理時間	: 1 [h]
総発熱量	: 450 [kW]	TG故障率	: $1 \times 10^{-10}$
空調機の冷却能力	: 40 [kW/台]	TG平均修理時間	: 170 [h]
許容温度上昇	: 13 [°C]	PAC故障率	: $1 \times 10^{-4}$
熱容量	: 30 [Wh/m <sup>2</sup> °C]	PAC平均修理時間	: 50 [h]
室内の発熱密度	: 300 [W/m <sup>2</sup> ]	AHU故障率	: $1 \times 10^{-5}$
REF故障率	: $2 \times 10^{-4}$	AHU平均修理時間	: 50 [h]
REF平均修理時間	: 30 [h]	バーナ故障率	: 0
GE故障率	: $2 \times 10^{-4}$	バーナ修理時間	: 0
GE平均修理時間	: 30 [h]	基準室温	: 27 [°C]
CS故障率	: $4 \times 10^{-7}$	基準外気温	: 32 [°C]
室温による冷却能力の変化係数 (C <sub>1</sub> )	: 750 [W/°C]		
外気温による冷却能力の変化係数 (C <sub>2</sub> )	: 285 [W/°C]		
外気温	: 年平均外気温度 (東京)		

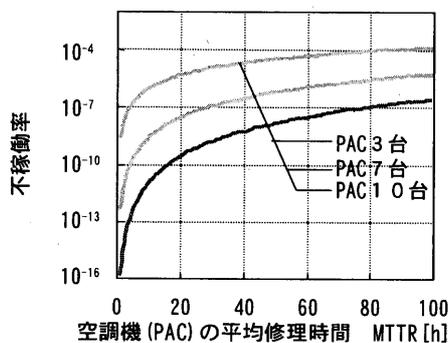


図8 空調機の平均修理時間とシステム不稼働率

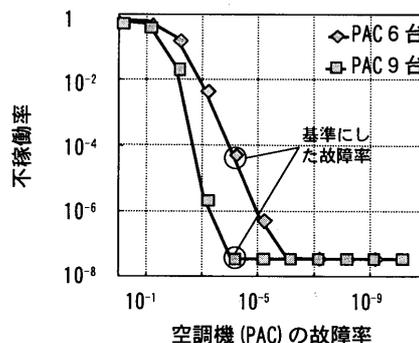


図9 空調機の故障率とシステム不稼働率の関係

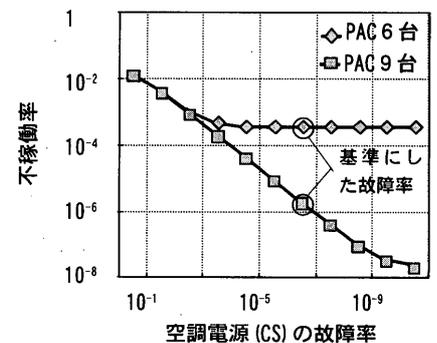


図10 空調電源の故障率とシステム不稼働率の関係

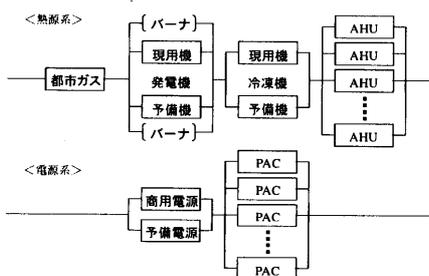


図11 熱源系空調機を含んだシステムの構成例

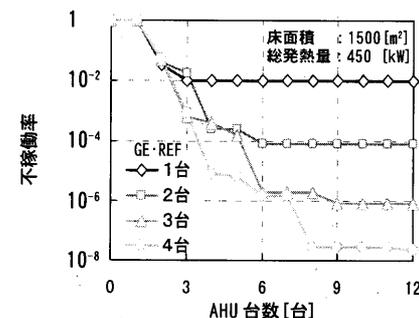


図12 AHU台数と不稼働率の関係

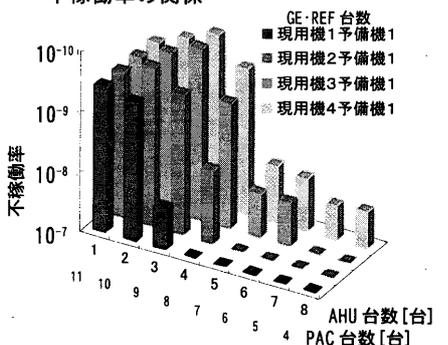


図13 GE・REF台数とAHU台数の関係

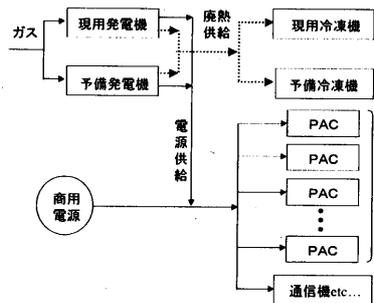


図14 システム構成

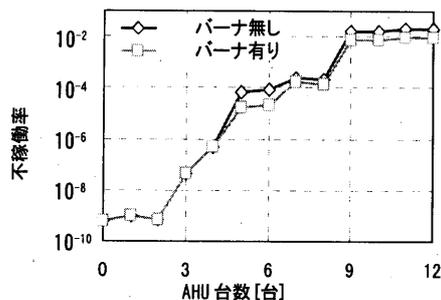


図16 発電機に併設したガスバーナの効果

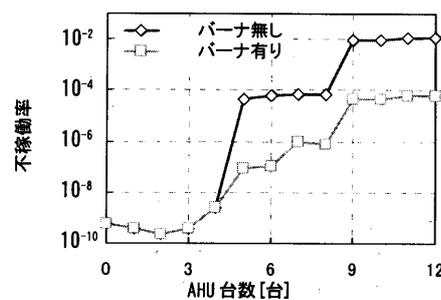


図17 REFに予備機1台つけた場合の効果

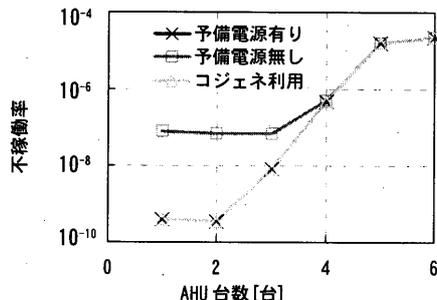


図15 電源方式と不稼働率の関係

表3 PACとAHUの台数と不稼働率の値

AHU	PAC 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0													
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													
11													
12													

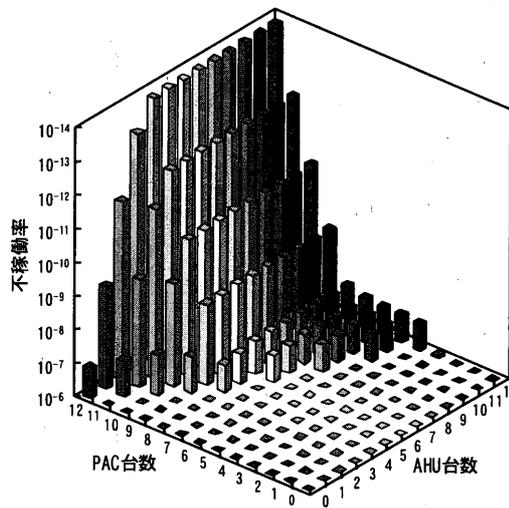


図18 PACとAHUの台数と不稼働率の値

ら考えると少なくとも12台の空調機が必要となる。PACの台数が少なくなると目標の不稼働率を実現するためにはGE・REFの組数が多くなり、現実的な構成が困難となる。一方、コージェネレーションシステムの総効率向上のためには、できるだけ熱源系空調機AHUの比率を高めることが望まれる。このような事情を考慮し、ここではGE・REFの組数が空調システム全体の稼働率に与える影響に着目するため、PAC台数を全体の50%である6台にした場合について検討する。

GE・REFの組数とGE・REFに接続されるAHU台数と空調システムの稼働率の関係を図12に示す。この結果から、GE・REFの台数が増加すると同じAHUの台数でも稼働率の値は小さくなる。その傾向は単調ではなく、階段状になっている。さらに、GE・REFの台数が増加するとAHUの台数の増加にともない稼働率が減少する。これは、GE・REFが1台故障した場合、稼働できるAHU台数の割合に起因する。例えば、GE・REFの台数が3台であり、AHUの台数も3台の場合、GE及びREFが1台故障すると、AHUも1台停止し、稼働するAHUは2台となる。また、同じ条件で、AHUが4台の場合も、AHU4台をGE・REF3台で支えることとなるため、GE及びREFが1台故障すると、稼働可能なAHUは2台となり、両者のシステム全体としての稼働率はそれほど変わらない。つまり、GE・REF1台の受け持つAHUの台数によって、空調システム信頼性は大きく変化する。

次にGE・REFは単体の信頼性が低いため、予備機を設ける場合がある。ここでは、総空調機台数を12台とし、空調機の台数の組み合わせを変化させ空調システムの稼働率を求めた。GE・REFの予備機を1台とし、現用機の台数ごとの結果を図13に示す。なお、空調システムに要求される稼働率を $10^{-7}$ とした場合である。

この結果から、GE・REFの台数が減少し1台のGE・REFが受け持つAHUの台数が増加すると稼働率が增大する。ここで検討した条件では、空調システムのGE・REFが1台につきAHUが2台以内としなければ $10^{-7}$ の稼働率を維持できない。このことは、GE・

REFの容量を小さくし、その台数を増加することにより、全空調機台数に占めるAHUの比率を増大させることが可能となる。

以上のように、GE・REF容量の大小が空調システム全体の信頼性に与える影響を定量的に推定するには、本例のような詳細な検討が必要となる。

### 5.2 電源系とのCGS

CGSの利用範囲を拡大するためには、発電した電力を空調システムに利用する方法が考えられる。ここでは、GEで作られた電力を、PACへ供給し利用する場合を考える。前節と同様に空調機の総台数を12台とし、1) 予備電源有り：商用電源の2系統受電、2) 予備電源無し：商用電源を1系統、3) コージェネ利用：商用電源+GE電源システム(図14)の3種類の構成を想定した。電源の種類ごとにAHUの台数と空調システムの稼働率の関係を図15に示す。この結果、CGSからの電源を商用電源(CS)と連携することで、予備電源を設けた場合と遜色ない効果が得られる。つまり、CGSからの電源をCSと連携することにより、CSのバックアップが可能となり空調システムの信頼性が確保できることがわかる。

### 5.3 GEへのバーナの効果

GEとREFが個別に設置されている場合、GEの故障に備えて、温熱源の確保のためバーナの設置が有効と考えられる。ここでは、バーナを設置したシステムと、設置していないシステムについて比較検討する。なお、GEとREFの台数は現用機2台のみとした。また、バックアップとして設けるバーナの容量はGEの発熱量と同等とした。さらに、バーナの故障はないものとし、故障率および平均修理時間をともに0とした。AHUの台数と不稼働率の関係を図16に示す。この結果から、AHUの台数が多くなると多少効果があるが、全体的にそれほど効果は期待できない。その理由は、GEとREFの単体での不稼働率はほぼ同等であるため、バーナの設置によりGEの信頼性を上げても、空調システム全体の不稼働率はREFの信頼性に拘束されてしまうためである。

以上のことから、GEに併設するバーナは、GE部分の信頼性がその他の部分よりも著しく劣っている場合に効果があると考えられる。ここでREFのみに予備機を1台つけた場合について、AHUの台数と不稼働率の関係を図17に示す。その結果、REFの予備機による信頼性の向上に伴い、バーナの効果が現れているのがわかる。つまり、熱源系システムを設計する場合、GEの予備機の分をバーナでバックアップするというシステムも一考する余地があることを示している。

### 5.4 信頼性評価の実施例

適切なシステム構成を知るには、実際に具体的なシステムを想定し、不稼働率を算出する必要がある。しかし、そのためには多数の数値を取り扱わなければならない。それらの値を全て変更して最適値を探すことは莫大な時間と労力が必要となり現実的ではない。さらに、出資可能コスト等が決定していれば、CS・TG・GE・REFの構成は、前項の内容を参照することにより凡その日安をつけることも可能となる。コージェネレーションシステムを用いた空調システムの場合、信頼性を確保しながら熱源系空調機AHUの比率を高めることが重要となる。つまり、最終的にはAHUとPACの台数比率をどうするかという点が、この問題の最大の争点になる。そこで、AHUとPAC台数以外の値を入力した状態で、検討すべきAHU台数とPAC台数を表で整理して表現すると、システム選定を容易に行えると考えられる。

計算結果の出力例を図18に示す。ここでは、5.1節の検討と同様に、設置空調機台数を12台とした。出力結果は、縦軸にAHUの台数、横軸にPACの台数をとり、設置空調機台数の部分をグレー表示した。この結果、PAC台数を変えず、AHUの台数だけを増やしても、REF・GEの1台が受け持つAHUの台数も増加するので、この部分はREF・GEの信頼性に依存することとなり、AHUの台数だけを増やしても信頼性はほぼ変化しない。つまり、信頼性にはAHUの台数よりもPACの台数が強く反映することがわかる。例えば、空調システムの不稼働率の目標値を $10^{-6}$ とした場合、全空調機台数12台のうちAHUを最大4台まで設置でき、空調システムの不稼働率の目標値を $10^{-7}$ とした場合、全空調機台数12台のうちAHUを最大3台まで設置できる。

## 6. 結論

情報処理用空調システムの信頼性に関する検討の結果、以下の知

見が得られた。

- 1) 空調システムの機能停止後、室温が許容値を超過するまでの時間を考慮すること、また外気温および室温により空調機の能力が変化することを考慮した信頼性評価方法を示した。
- 2) システム構成の簡単なPACを用いた空調システムの信頼性評価を行い、a) 室温変化による空調機冷却能力の変化は空調システムの不稼働率に大きな影響を与えるため無視できないこと、b) 許容温度範囲の拡大は予備機の削減に大きく寄与すること、c) 同じ信頼性を確保する場合、一台の機器容量を小さくすることにより予備機を含めた空調容量が小さくなること、d) 機器の修理時間の短縮が信頼性向上に寄与すること、e) 機器が直列に構成されたシステムの場合、構成する機器の故障率を十分考慮した上で予備機の設置の検討が必要なことなど 各種システムを構成する機器の条件がシステム全体の信頼性に与える影響を把握した。
- 3) CGSの排熱を利用した複雑な空調システムの信頼性評価を行い、a) 1組のGE・REFが分担するAHUの台数が空調システム全体の不稼働率に影響を与えること、b) CGSで得られた電力を空調システムで利用する場合、CSの電力との連携(バックアップ)により、信頼性が確保され、予備のGEなどを不用にすること、c) GEの故障をバックアップするバーナは、GEの信頼性がその他の部分よりも著しく劣っている場合のみ有効であることなどを定量的に明らかにした。

### 謝辞

本研究の一部は、住友財団2003年度研究助成「積雪寒冷都市における環境共生と適正な自然循環のためのシステム技術に関する研究」(研究代表: 絵内正道)の一環で行った。また、本論文をまとめるにあたりNTTファシリティーズ松島修氏・須藤勇氏・木下学氏、総合設備コンサルタント高草木明氏から有益な助言をいただいた。記して感謝する。

### 参考文献

- 1) 渡邊均, 林正博, 羽山広文: コージェネレーションシステムを用いた空調システムの信頼性評価法に関する研究 その1 評価手法と基本特性, 日本建築学会計画系論文集, 第564号, pp. 63-70, 2003. 2
- 2) 松浦房次郎, 佐々木隆: 空調装置の多重化に関する検討(その1), 空気調和・衛生工学会学術講演会論文集, pp. 297-300, 1976
- 3) 高発熱機械室用冷却装置サービスマニュアル, ダイキン工業
- 4) 羽山広文, 中里秀明, 木下学, 倉淵隆: 強制空冷機器を収容した機械室における空調方式の高効率化に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, 第494号 pp. 29-36, 1997. 4
- 5) 羽山広文, 大島一夫, 高草木明, 松島修: 空調停止後の室温変化を考慮した空調設備の信頼性評価に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, 第507号, pp. 71-78, 1998. 5
- 6) 阿南陽介, 羽山広文, 絵内正道, 森太郎, 石澤輝彦: 情報処理用空調システムの信頼性評価に関する研究 その1 計算方法の概要と計算例, 日本建築学会大会学術講演梗概集環境工学II(北陸), pp. 1115-1116, 2002. 8
- 7) 阿南陽介, 羽山広文, 絵内正道, 森太郎, 木下学: コージェネレーションシステムを用いた空調システムの信頼性評価(その1) パッケージ型空調システムと熱回収型空調システムの評価, 空気調和・衛生工学会学術講演会論文集 III(福岡), pp. 1149-1152, 2002. 9

(2004年2月25日原稿受理, 2004年6月17日採用決定)