

## 高速増殖大型炉の設計主要目に関する研究(Ⅲ)

### 動的信頼性解析コード DRAC 02 の検証と適用

1989年5月

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

# 高速増殖大型炉の設計主要目に関する研究(III)

## 動的信頼性解析コードDRAC02の検証と適用

藤井 正<sup>1)</sup>, 棟方 哲弥<sup>2)</sup>  
森山 正敏<sup>1)</sup>

### 要 旨

- (目的) 原子炉停止後において、崩壊熱の時間変化に伴い炉心冷却に必要な除熱容量が低下すること、及び機器の故障・修復に伴い冷却能力が時間的に推移することを考慮した崩壊熱除去系の動的信頼性解析コードDRAC02を検証し、実機プラントへの適用をはかる。
- (方法) まずコード検証のための簡易モデルとして、4系統の崩壊熱除去系から構成されるプラントを対象に、非常用ディーゼル発電機(D/G)の冗長性と除熱ループ数をパラメータとして信頼度を評価した。さらに非常用D/Gに着目して、IMPROVEコードを用いて、非常用D/Gの故障がシステムの故障に与える影響を表す重要度を評価した。
- 次に、実機プラントの崩壊熱除去系への適用例として、60年度要素技術設計研究(II)におけるIRACS(2次系共用型補助炉心冷却系)、及び63年度リファレンスプラント設計研究におけるPRACS(IHX内蔵型直接炉心冷却系)を対象に、DRAC02コードを用いて、系統分離、自然循環除熱の有効性をパラメータに信頼度を評価した。
- (結果) 簡易モデルの信頼度評価結果を従来のフォールト・ツリー解析結果と比較し、マルコフ・モデルに関する計算手順の妥当性を確認した。さらに重要度評価により、システムの信頼度に対する非常用D/Gの依存性が明確になった。
- また実機プラントへの適用解析では、いずれのシステムとも $10^{-7}$ /作動要求以下の非信頼度を示したが、今後入力として与えた機器の故障率データに基づく解析結果の不確かさを評価する必要がある。
- (結論) フォールト・ツリー解析との比較により、DRAC02コードの解析機能を検証した。またこれらの信頼度評価結果から、実機プラントの崩壊熱除去系として、非常用D/Gを2台設置し、[50%×4系統]の除熱容量とするシステム構成が望ましいことがわかった。

1) 大洗工学センター 技術開発部プラント工学室

2) 株式会社ケー・エス・シー

PNC-TN9410 89-094  
May , 1989

## Study on the Main Design Parameters of Large Scale Fast Breeder Reactor(III)

### Validation and Application of Dynamic Reliability Analysis Code DRAC02

T.FUJII<sup>1)</sup> , T.MUNEKATA<sup>2)</sup>  
M.MORIYAMA<sup>1)</sup>

#### Abstract

The purpose of this study is to verify the dynamic reliability analysis code DRAC02 for decay heat removal system (DHRS), which was considered the transition of required removal heat according to the time-dependency of decay heat, and the transition of plant coolability due to the failure and repair of plant components after the reactor shutdown. And also the purpose is to apply the DRAC02 code for the practical plants.

Firstly, as the simplified model for verification of this code, parametric reliability analyses of the plant which comprises four DHRSs were performed with respect to the redundancy of the emergency diesel generators (D/Gs), and the number of heat removal loops. Further noticing the D/Gs, using IMPROVE code, importance analyses of above plant were performed. In this report, importance was represented the influence on the failure of plant systems due to the failure of the D/Gs.

Next, using DRAC02 code, as the application for practical plants, parametric analyses of the Intermediate Reactor Auxiliary Cooling Systems (IRACSs) of the Key Technological Design Study(II) in 1985, and of the Primary Reactor Auxiliary Cooling Systems (PRACSSs) of the Reference Plant Design Study in 1988 were performed with respect to the system diversity, and the effectiveness of natural circulation heat removal.

The reliability results of the simplified model were compared with those of usual fault-tree analyses. Consequently, validity of the calculation procedure of the Markov model was confirmed. Moreover, dependency of D/Gs to the system reliability were made clear by the importance evaluations.

---

1)Plant Engineering Office, Technology Development Division, OEC, PNC.  
2)KSC Inc.

Further, in the application analyses, the results showed that the unreliability of both systems were less than  $10^{-7}$ /demand. However, it was necessary to evaluate the uncertainty of the results due to the data of the failure and repair rates of the components which were given as input data.

According to the comparison of the fault-tree analyses, analytical capability of DRACO2 code was verified. And on the basis of these reliability results, it was found that the following constitution was desirable for the DHRSSs of the practical plant ; the system has two D/Gs (two system diversity), and heat removal capacity of DHRSSs was [fifty percent $\times$ four systems].

## 目 次

要 旨

表リスト

図リスト

記号及び略号の説明

1. 緒 言 .....	1
2. 動的信頼性評価解析コードDRAC02の検証 .....	5
3. システム重要度評価 .....	42
4. 要素技術設計研究でのIRACS信頼度評価 .....	55
5. リファレンスプラントでのPRACS信頼度予備評価 .....	76
6. 実機プラント設計への反映 .....	87
7. まとめと今後の課題 .....	90
8. 謝 辞 .....	93
9. 参考文献 .....	94

## 表 リ ス ト

表2-1	「2 out of 4」システムの真理表 .....	13
表2-2	CASE2-2の故障率、修復率、起動失敗確率 .....	14
表2-3	パラメータサーベイの解析ケース .....	14
表2-4	CASE2-1の非信頼度 .....	15
表2-5	CASE2-3の非信頼度 .....	15
表2-6	CASE2-5の非信頼度 .....	16
表2-7	CASE2-7の非信頼度 .....	16
表2-8	CASE2-2の非信頼度 .....	17
表2-9	CASE2-4の非信頼度 .....	17
表2-10	CASE2-6の非信頼度 .....	18
表2-11	CASE2-8の非信頼度 .....	18
表2-12	完全従属[1/4]のシステムの故障状態 .....	19
表3-1	ミニマルカットセットの比較 .....	47
表3-2	非信頼度の比較(1) .....	48
表3-3	リスク減少価値(R.R.W.)とリスク増加価値(R.A.W.) .....	49
表3-4	リスク増加価値(R.A.W.)の比較 .....	50
表3-5	リスク減少価値(R.R.W.)の比較 .....	50
表3-6	非信頼度の比較(2) .....	51
表3-7	非信頼度の比較(3) .....	51
表3-8	非信頼度の比較(4) .....	52
表3-9	非信頼度の比較(5) .....	52
表4-1	IRACSの仕様 .....	62
表4-2	IRACSコンポーネントの選定 .....	63
表4-3	IRACSサブシステムの選定 .....	63
表4-4	IRACSサブシステムの機能分類 .....	64
表4-5	IRACSサクセス・クライテリアの選定 .....	64
表4-6	IRACSコンポーネントの起動失敗確率、故障率、修復率 .....	65
表4-7	IRACSシステム信頼性評価解析ケース .....	66

表5-1	PRACSのサクセス・クライテリア .....	80
表5-2	サクセス・クライテリアを満足するプラント状態数[時間区分2] .....	80
表5-3	PRACSコンポーネントの選定 .....	81
表5-4	PRACSサブシステムの選定 .....	81
表5-5	PRACSサブシステムの機能分類 .....	82
表5-6	PRACSコンポーネントの起動失敗確率、故障率、修復率 .....	82
表5-7	PRACSの除熱モード .....	83

## 図 リ ス ト

図1-1	崩壊熱除去系の状態遷移 .....	3
図1-2	動的信頼性評価解析コードの解析機能 .....	4

図2-1	テスト計算でのシステム構成 .....	20
図2-2	非稼働度 $\bar{A}$ 、非信頼度 $\bar{R}$ の比較 .....	21
図2-3	完全独立[4/4]のフォールト・ツリー [CASE2-1] .....	22
図2-4	完全従属[1/4]のフォールト・ツリー [CASE2-1] .....	23
図2-5	完全独立[4/4]のフォールト・ツリー [CASE2-2] .....	24
図2-6	完全従属[1/4]のフォールト・ツリー [CASE2-2] .....	25
図2-7	非信頼度 $\bar{R}$ の比較(1) .....	26
図2-8	完全独立[4/4]のフォールト・ツリー [CASE2-3] .....	27
図2-9	2系統分離[2/4]のフォールト・ツリー [CASE2-3] .....	28
図2-10	完全従属[1/4]のフォールト・ツリー [CASE2-3] .....	29
図2-11	完全独立[4/4]のフォールト・ツリー [CASE2-4] .....	30
図2-12	2系統分離[2/4]のフォールト・ツリー [CASE2-4] .....	31
図2-13	完全従属[1/4]のフォールト・ツリー [CASE2-4] .....	32
図2-14	非信頼度 $\bar{R}$ の比較(2) .....	33
図2-15	完全独立[4/4]の健全確率 [CASE2-5、2-6] .....	34
図2-16	完全従属[1/4]の健全確率 [CASE2-5、2-6] .....	35
図2-17	非信頼度 $\bar{R}$ の比較(3) .....	36
図2-18	完全独立[4/4]の健全確率 [CASE2-7、2-8] .....	37
図2-19	2系統分離[2/4]の健全確率 [CASE2-7、2-8] .....	38
図2-20	完全従属[1/4]の健全確率 [CASE2-7、2-8] .....	39
図2-21	非信頼度 $\bar{R}$ の比較(4) .....	40
図2-22	完全従属[1/4]システムにおけるD/Gの構成上の重要度 .....	41

図3-1 各システムの非信頼度評価結果 ..... 53

図4-1 要素技術設計研究(II)の2次系配置図 ..... 67

図4-2 要素技術設計研究(II)のIRACSモデル ..... 68

図4-3 IRACS信頼性評価結果 [CASE4-1] ..... 69

図4-4 IRACS信頼性評価結果 [CASE4-2] ..... 70

図4-5 IRACS信頼性評価結果 [CASE4-1とCASE4-2の比較] ..... 71

図4-6 IRACS信頼性評価結果 [CASE4-2とCASE4-3の比較] ..... 72

図4-7 IRACS信頼性評価結果 [CASE4-4] ..... 73

図4-8 IRACS信頼性評価結果 [CASE4-1とCASE4-4の比較] ..... 74

図4-9 IRACS信頼性評価結果 [CASE4-5] ..... 75

図5-1 リファレンスプラントPRACSの概要 ..... 84

図5-2 必要除熱量の推移 ..... 85

図5-3 PRACS信頼性予備解析結果 ..... 86

## 記号及び略号の説明

記 号	説 明	単 位
A	非稼働度	(-)
R	非信頼度	(-)
$\lambda$	故障率	(1/hr)
$\mu$	修復率	(1/hr)

略 号	説 明
D/G : Diesel Generator	非常用ディーゼル発電機
DHRS : Decay Heat Removal System	崩壊熱除去系
DRAC : Dynamic Reliability Analysis Code	動的信頼性評価解析コード
F/C : Forced Circulation	強制循環除熱
FTA : Fault Tree Analysis	システム信頼性解析コード
IRACS : Intermediate Reactor Auxiliary Cooling System	2次系共用型補助炉心冷却系
N/C : Natural Circulation	自然循環除熱
PRACS : Primary Reactor Auxiliary Cooling System	IHX内蔵型直接炉心冷却系
R.A.W. : Risk Achievement Worth	リスク増加価値
R.R.W. : Risk Reduction Worth	リスク減少価値
SETS : Set Equation Transformation System	フォールト・ツリー解析コード

## 1. 緒 言

高速増殖炉の安全設計においては、仮想的な炉心崩壊事故を設計基準外事象として位置づけるため、原子炉停止系と並んで崩壊熱除去系は高い信頼性が要求されており、定量的な信頼度評価手法の確立が望まれている。これまで信頼度評価手法としてよく使用されるフォールト・ツリー解析では、崩壊熱除去系のように使命時間が1ヵ月程度と長く、時間とともに要求される機能が推移するシステムを合理的に評価することが困難であった。

そこで、原子炉停止後においてプラントの状態が推移する過程を考慮した動的信頼性評価解析コードDRAC02を開発し、前報「崩壊熱除去系の動的信頼性評価手法の開発」<sup>1)</sup>において、解析モデルの説明、及び解析機能の確認を目的としたテスト計算結果を報告した。

### 1.1 DRAC02コードの特徴

以下、DRAC02コードの特徴を簡単に説明する。DRAC02コードでは、図1-1に示すような崩壊熱除去系の状態遷移過程として、次の2項目の取扱いを考慮している。

#### ①崩壊熱の時間変化に従った必要除熱量の推移

原子炉が停止して以後も、炉心からは長期にわたり崩壊熱が発生するが、時間経過にしたがって徐々に低下する。これに伴い、炉心冷却に必要な崩壊熱除去系の除熱容量、すなわち必要除熱量も低下する。この必要除熱量は、プラントが健全性を確保できる条件(サクセス・クライテリア)として除熱に必要な崩壊熱除去系の運転モード、及び系統数の組合せを規定する。

したがって原子炉が停止して初期のうちは、必要除熱量も大きいため、複数系統の強制循環除熱が必要となり、崩壊熱除去系全体に高い信頼性が要求される。一方、原子炉停止から長時間経過した後は、必要除熱量も小さいため、自然循環除熱でも充分となり、過大な信頼性を必要とはしない。

#### ②プラント機器の故障・修復を考慮した冷却能力の推移

強制循環除熱時において、冷却系ポンプ等の動的機器の故障を想定しても、静的機器である冷却系配管が健全であれば、自然循環除熱への移行が期待できる。また動的機器が修復できれば、再度強制循環除熱が可能となる。

一方冷却系配管が破損した場合には、他の機器の状態によらず、破損ループの除熱は期待できない。このようにプラントを構成する機器の故障・修復を考慮すると、必要除熱量の確保に利用できる運転モード及び系統数が時間的に推移することを示唆している。

### ③DRAC02でのモデル化

図1-2にDRAC02コードの特徴を示す。

DRAC02コードでは、崩壊熱に従った必要除熱量の低下によるサクセス・クライテリアの推移を時間区分(Phased Mission)法で取り扱っている。すなわち、任意の時間区分内では、同一のサクセス・クライテリアを適用し、崩壊熱除去系全体の信頼性を評価するものである。通常、これらのサクセス・クライテリアとしては、必要除熱量を満足する最小の運転モード及び系統が用いられる。

一方、崩壊熱除去系の構成及び運転モードに従った除熱能力の推移は、単位時間あたりにおける機器の故障率・修復率からマルコフ・モデルに基づき評価する。すなわち、個々の機器の健全性は、時間にのみ依存するものと仮定し、崩壊熱除去系全体の信頼性を評価するものである。

DRACコードでは、崩壊熱除去系の機器構成をもとに、上記の2つのモデルを用い、各時刻においてサクセス・クライテリアを満足する確率を求めるとともに、崩壊熱除去系全体の非稼働度 $\bar{A}(t)$ (Unavailability;時刻tで機能を喪失している確率)、非信頼度 $\bar{R}(t)$ (Unreliability;時刻tまでに機能を喪失する確率)を評価する。また本コードでは非常用ディーゼル発電機(D/G)等、系統間の共用設備を対象とした従属故障モードの取扱いが可能である。

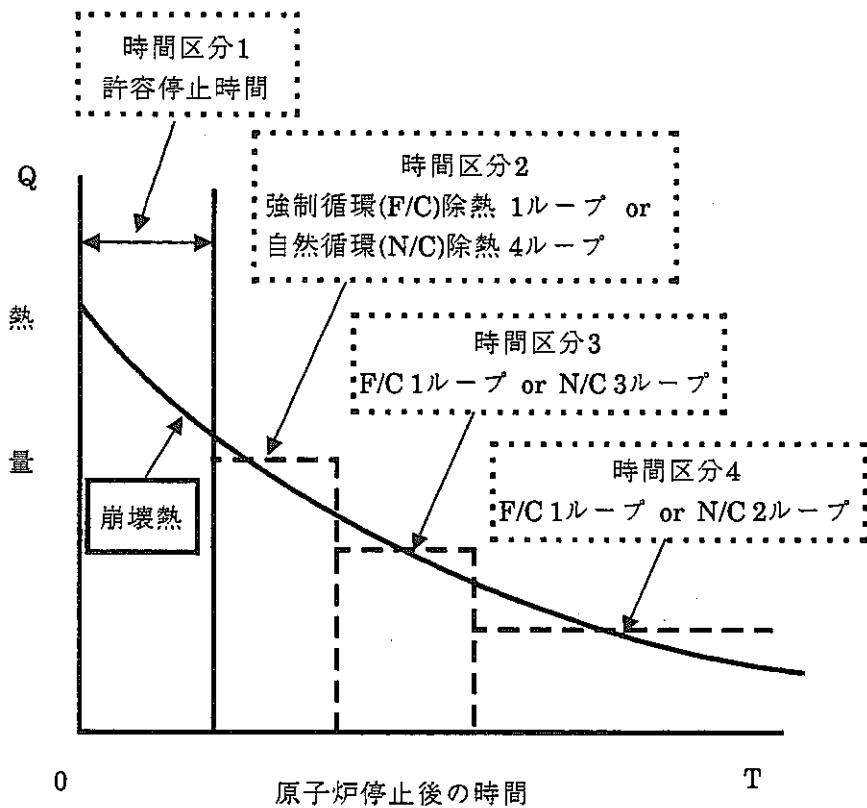
## 1.2 本報告の概要

本報告では、まずDRAC02コードの検証を目的として、前報のテスト計算で用いた非常用D/Gから給電される強制循環除熱方式の4系統の崩壊熱除去系(DHRS)から構成されるプラントを対象として、非常用D/Gの冗長性と必要ループ数(サクセス・クライテリア)をパラメータとして3種類のシステムの信頼度解析結果を、従来手法であるフォールト・ツリー解析(FTA)結果と比較した。

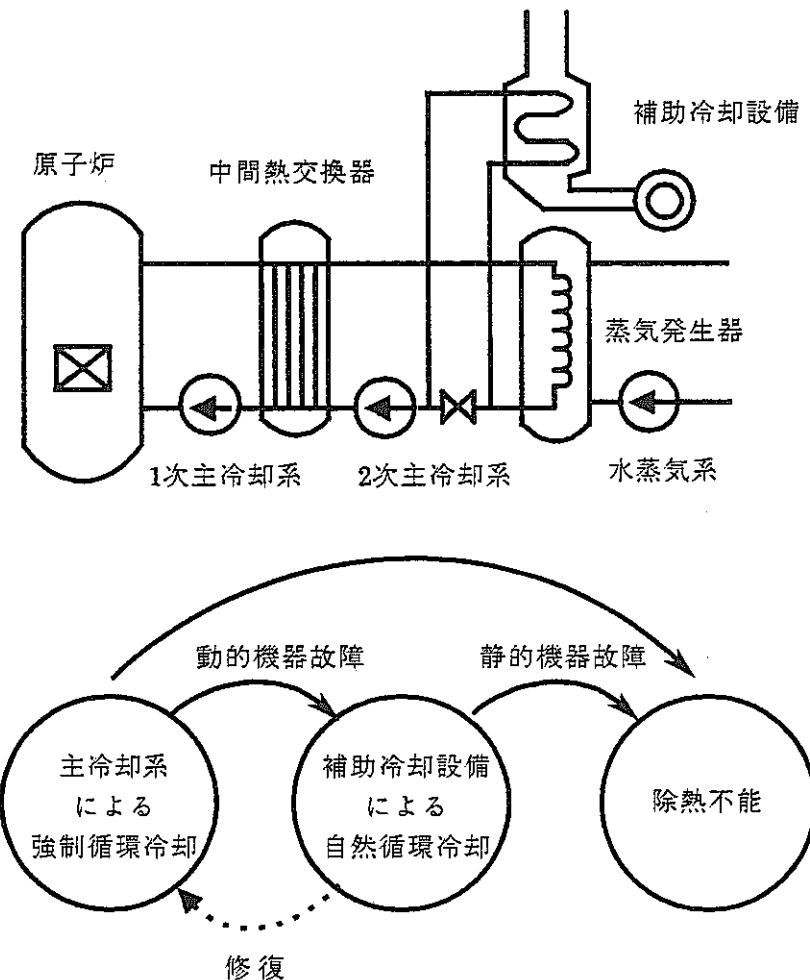
また非常用D/Gに着目して、SETSコード<sup>2)</sup>、及びIMPROVEコード<sup>3)</sup>を用いて、D/G故障がシステムの故障に与える影響の度合いである重要度を評価し、3種類のシステムの信頼度特性を明確にした。

次に、実機プラントの崩壊熱除去系への適用例として、60年度要素技術設計研究(II)におけるIRACS(Intermediate Reactor Auxiliary Cooling System:2次系共用型補助炉心冷却系)、及び63年度リファレンスプラント設計研究におけるPRACS(Primary Reactor Auxiliary Cooling System:1次系共用型直接炉心冷却系)を対象に、DRAC02コードを用いて、系統分離、自然循環除熱の有効性をパラメータに信頼度を評価した。

最後に、これらの信頼度評価結果をもとに、崩壊熱除去系の構成について検討した。



(a) 崩壊熱の時間変化に従った必要除熱量の推移



(b) 機器の故障・修復を考慮した冷却能力の推移

図1-1 崩壊熱除去系の状態推移

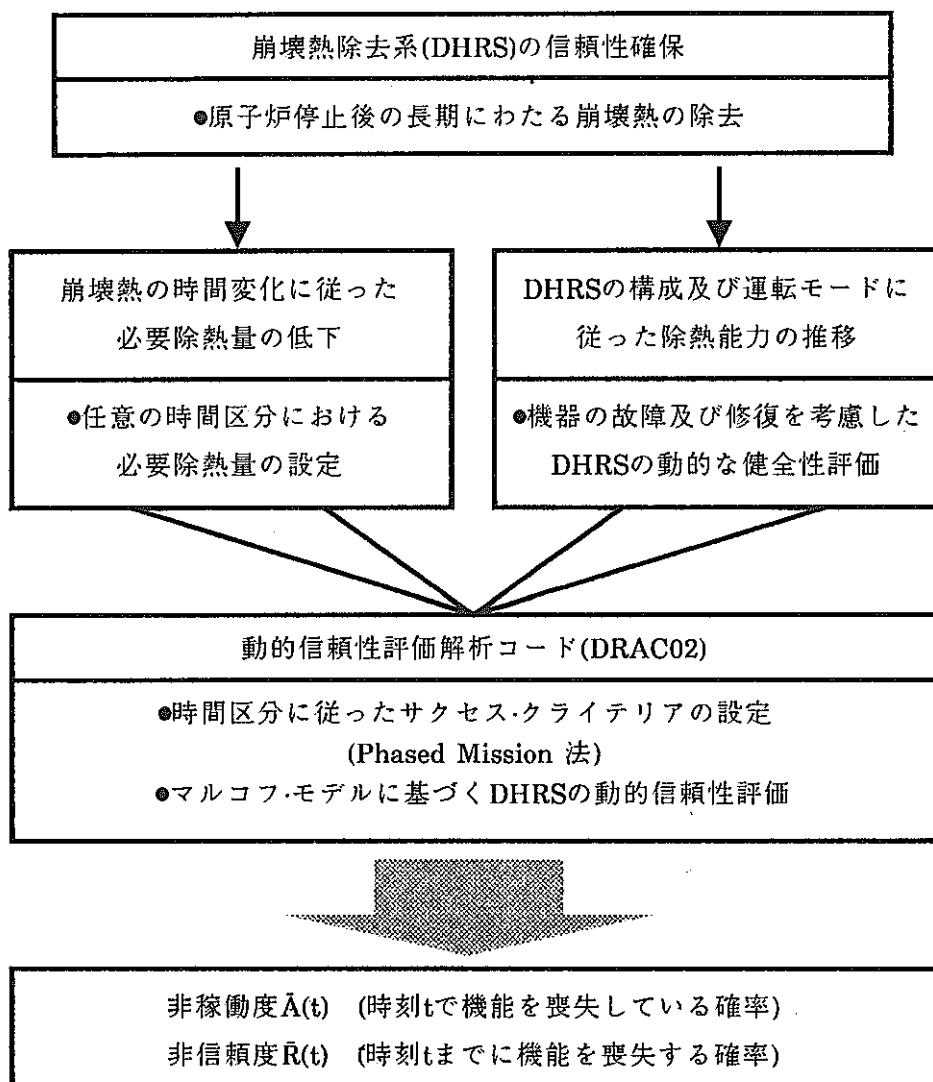


図1-2 動的信頼性評価解析コードの解析機能

## 2. 動的信頼性評価解析コードDRAC02の検証

### 2.1 概 要

前報「崩壊熱除去系の動的信頼性評価手法の開発」では、図2-1に示すような非常用D/Gから給電される強制循環除熱方式の4系統の崩壊熱除去系(DHRS)から構成されるプラントを対象として、非常用D/Gの冗長性が異なる3種類のシステム(完全独立[4/4]、2系統分離[2/4]、完全従属[1/4])を対象に、DRAC02コードのテスト計算を実施している。

いずれのシステムとも、DHRS単体の故障、さらには接続する非常用D/Gの故障に伴う電源喪失により強制循環除熱機能が喪失しDHRSが故障する(自然循環除熱には期待しない)と想定している。DRAC02では、2つのコンポーネントの故障率を与えて、使命時間までの故障確率を求め、パラメータとして設定したサクセス・クライテリア(必要ループ数)を満足するかを判断し、信頼度として評価している。(なお、コンポーネントの起動失敗確率は考慮していない。)

図2-2は、「C<sub>1</sub>(崩壊熱除去系)4系統のうち、2系統以上が健全であれば良い」というサクセス・クライテリアで、1000時間までの各システムの非稼働度、及び非信頼度の解析結果を示したものである。これより冗長性の最も高い完全独立[4/4]のシステムの非信頼度が、他の2つのシステムより大きい、すなわち信頼度が劣る結果となった。このDRAC02コードの結果の妥当性を証明するため、コードの検証という観点から、故障率データとサクセス・クライテリアをパラメータに、従来からの信頼性評価手法であるフォールト・ツリー解析(FTA)との比較を実施した。

## 2.2 フォールトツリー解析(FTA)との比較

### (1)ベースケースでの比較

図2-1に示したように、サクセス・クライテリアが「C<sub>14</sub>系統のうち、2系統以上が健全であれば良い」という条件から、FTAでは「C<sub>1</sub>が3系統以上機能を喪失する確率」を求めることがある。非信頼度の逆転は、図2-2より約400時間以降で起こっているため、FTAではその前後の時刻、100時間と1000時間の時点での非信頼度を求めることにした。

#### a)コンポーネントの故障確率

100時間と1000時間の時点でのC<sub>1</sub>(DHRS)とC<sub>2</sub>(D/G)の故障確率は、各機器の故障率データλ(1/hr)を用いて、次式で求められる。

$$\begin{aligned} F_1 &= 1.0 - \text{EXP}(-\lambda_1 \times t) & (2.1) \\ &= 1.0 - \text{EXP}(-0.001 \times 100) = 0.0952 & \text{(100時間)} \\ &= 1.0 - \text{EXP}(-0.001 \times 1000) = 0.6321 & \text{(1000時間)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_2 &= 1.0 - \text{EXP}(-\lambda_2 \times t) & (2.2) \\ &= 1.0 - \text{EXP}(-0.002 \times 100) = 0.1813 & \text{(100時間)} \\ &= 1.0 - \text{EXP}(-0.002 \times 1000) = 0.8647 & \text{(1000時間)} \end{aligned}$$

このように、1000時間の時点における各コンポーネントの故障確率は、λが10<sup>-3</sup>/hr程度の場合、非常に大きくなることがわかる。

## b)完全独立[4/4]のシステムの非信頼度

完全独立[4/4]のシステムは、C<sub>1</sub>1系統ごとにC<sub>2</sub>1台が接続するもので、C<sub>1</sub>自体、またはC<sub>1</sub>に給電するC<sub>2</sub>の故障のどちらかで1系統の機能が喪失することになる。

プラントは4ループ構成なので、C<sub>1</sub>が3系統以上機能を喪失する事象は、表2-1に示すように「2 out of 4」のシステムの真理表から5通りとなる。すなわち、4系統とも機能が喪失する事象と、1系統は健全であるが、残り3系統の機能が喪失する事象(4通り)の、計5事象の確率の論理和ORをとることにより、崩壊熱除去系(DHRS)の機能が喪失する確率(非信頼度R)が評価できる。

図2-3は、完全独立[4/4]のシステムのフォールトツリー(FT)を示したものである。なお図中の⊕は、論理和ORを表し、⊗は、論理積ANDを表すものとする。

まず4系統のうちの1系統、仮にAループに着目すると、Aループの機能喪失確率は、2つのコンポーネントの故障確率のORをとって、次式で与えられる。

$$F_A = F_1 \oplus F_2 = F_1 + F_2 - F_1 \times F_2 \quad (2.3)$$

つぎに、1系統は健全であるが、残り3系統の機能が喪失した場合の確率は、以下の4式で与えられる。

$$F_{ABC} = F_A \otimes F_B \otimes F_C \otimes (1 - F_D) \quad (2.4)$$

$$F_{ABD} = F_A \otimes F_B \otimes (1 - F_C) \otimes F_D \quad (2.5)$$

$$F_{ACD} = F_A \otimes (1 - F_B) \otimes F_C \otimes F_D \quad (2.6)$$

$$F_{BCD} = (1 - F_A) \otimes F_B \otimes F_C \otimes F_D \quad (2.7)$$

また、4系統とも機能喪失した場合の確率は、次式で与えられる。

$$F_{ABCD} = F_A \otimes F_B \otimes F_C \otimes F_D \quad (2.8)$$

したがって、頂上事象であるDHRSの機能が喪失する確率、すなわち非信頼度Rは、

$$R = F_{ABC} \oplus F_{ABD} \oplus F_{ACD} \oplus F_{BCD} \oplus F_{ABCD} \quad (2.9)$$

となる。

本解析では、各系統とも同一のサブシステムであるため、次式が成り立つ。

$$F_A = F_B = F_C = F_D \quad (2.10)$$

これより、(2.9)式は、次のように書き換える。

$$\begin{aligned} R &= F_A^3(1 - F_A) + F_A^3(1 - F_A) + F_A^3(1 - F_A) + F_A^3(1 - F_A) + F_A^4 \\ &= 4F_A^3 - 3F_A^4 \end{aligned} \quad (2.11)$$

図2-3の下側に、100時間と1000時間の時点における非信頼度Rを、FTA((2.11)式から求めた値)、及びDRAC02の計算結果を比較して示す。これよりDRAC02の計算結果は、ほぼFTAの計算結果と一致していることがわかる。

## c)完全従属[1/4]のシステムの非信頼度

一方完全従属[1/4]のシステムは、C<sub>1</sub>4系統全てが、1台のC<sub>2</sub>に接続するものである。このシステムでは、C<sub>1</sub>側の故障確率(4系統とも機能が喪失する事象と、1系統は健全であるが、残り3系統の機能が喪失する事象(4通り))と、C<sub>1</sub>に給電するC<sub>2</sub>の故障確率のORをとることにより、DHR<sub>S</sub>の非信頼度R̄が評価できる。図2-4は、完全従属[1/4]のシステムのFTを示したものである。(なお、2系統分離[2/4]のシステムについては、FTが大きくなるため、割愛する。)

C<sub>1</sub>側の故障確率については、表2-1の「2 out of 4」の真理表をループではなく、コンポーネントC<sub>1</sub>に置き換えればよい。まず1系統は健全であるが、残り3系統の機能が喪失した場合の確率は、以下の4式で与えられる。なお添字の1は、C<sub>1</sub>を表し、A,B,C,Dは、ループを表している。

$$F_{1ABC} = F_{1A} \otimes F_{1B} \otimes F_{1C} \otimes (1 - F_{1D}) \quad (2.13)$$

$$F_{1ABD} = F_{1A} \otimes F_{1B} \otimes (1 - F_{1C}) \otimes F_{1D} \quad (2.14)$$

$$F_{1ACD} = F_{1A} \otimes (1 - F_{1B}) \otimes F_{1C} \otimes F_{1D} \quad (2.15)$$

$$F_{1BCD} = (1 - F_{1A}) \otimes F_{1B} \otimes F_{1C} \otimes F_{1D} \quad (2.16)$$

また、4系統とも機能喪失した場合の確率は、次式で与えられる。

$$F_{1ABCD} = F_{1A} \otimes F_{1B} \otimes F_{1C} \otimes F_{1D} \quad (2.17)$$

本解析では、各系統のC<sub>1</sub>は同一であるため、次式が成り立つ。

$$F_{1A} = F_{1B} = F_{1C} = F_{1D} \quad (2.18)$$

これより、C<sub>1</sub>側の故障確率は、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} F_{1N} &= F_{1ABC} \oplus F_{1ABD} \oplus F_{1ACD} \oplus F_{1BCD} \oplus F_{1ABCD} \\ &= (4F_{1A}^3 - 3F_{1A}^4) \end{aligned} \quad (2.19)$$

したがって非信頼度R̄は、C<sub>1</sub>側の故障確率と、C<sub>2</sub>の故障確率のORをとり、次式で与えられる。

$$\bar{R} = F_{1N} \oplus F_2 = F_{1N} + F_2 - F_{1N} \times F_2 \quad (2.20)$$

図2-4の下側に、100時間と1000時間の時点における非信頼度R̄を、FTA、及びDRAC02の計算結果を示す。完全従属[1/4]のシステムについても、DRAC02の計算結果は、FTAの計算結果と一致している。図2-3、図2-4の結果よりわかるように、

$$\bar{R}_{[4/4]} < \bar{R}_{[1/4]} \quad (100\text{時間})$$

$$\bar{R}_{[4/4]} > \bar{R}_{[1/4]} \quad (1000\text{時間})$$

となり、サクセス・クライテリアがC<sub>1</sub>4系統中2系統の場合には、FTAを用いても、完全独立[1/4]のシステムと完全独立[4/4]のシステムの信頼度が、100時間と1000時間の時点で逆転する結果となり、図2-2に示したDRAC02の結果を裏付けている。

## (2)故障率データ、及びサクセス・クライテリアのパラメータサーベイ

(1)で述べたベースケースでは、故障率データ、サクセス・クライテリアを暫定的に設定していた。そこで、これら2つのパラメータがどのようにシステムの信頼度に影響するかを評価するため、表2-2に示す実機プラント(PRACSを想定)の故障率データと置き換えた場合と、「C<sub>14</sub>系統のうち、2系統以上が健全であれば良い」以外のサクセス・クライテリアの場合についてサーベイした。

表2-3には、ベースケースも含め、計8ケースの解析条件を示す。

### a)故障率データの影響

まずサクセス・クライテリアは、ベースケースと同様に「C<sub>14</sub>系統のうち、2系統以上が健全であれば良い」とし、PRACS評価用のC<sub>1</sub>とC<sub>2</sub>の故障率データとした場合(CASE2-2)の結果を図2-5、及び図2-6に示す。

このように機器の故障率データが $10^{-5} \sim 10^{-6}/\text{hr}$ 程度と非常に小さい場合には、冗長性の高いシステムの方が、信頼度が高くなることがわかる。

また図2-7は、DRAC02コードによる1000時間までの非信頼度を、故障率の大小で比較したものある。故障率が大きい場合には、3つのシステムの非信頼度の逆転が起こるが、実機評価用の故障率データとした場合には、3つのシステムの非信頼度は、1オーダ以上の差が1000時間にわたって維持され、冗長性に応じた信頼度となっている。

したがって、暫定的に大きな故障率データを用いた場合には、たとえシステム構成上の冗長性を高めても、コンポーネント数が増加しているため、その冗長性が打消されるようになり、図2-2、図2-7に示すような完全独立のシステムの信頼度が逆転したものと考えられる。

### b)サクセス・クライテリアの影響

従来の「C<sub>14</sub>系統のうち、2系統以上が健全であれば良い」という条件から、まず「C<sub>14</sub>系統のうち、1系統以上が健全であれば良い」というように変更した場合(CASE2-3、2-4)について評価した。この場合、FTAでは「C<sub>1</sub>が4系統とも機能を喪失する確率」を求めることになる。

図2-8~2-13は、「C<sub>14</sub>系統のうち、1系統以上が健全であれば良い」の場合の、FTAとDRAC02の結果を示したものである。CASE2-3、2-4とも100時間と1000時間におけるFTAとDRAC02の非信頼度は、ほぼ一致していることがわかる。また図2-14に示すように、機器の故障率の大小にかかわらず、冗長性に応じた信頼度を評価することがわかった。

つぎに、「C<sub>14</sub>系統のうち、3系統以上が健全であれば良い」というように変更した場合(CASE2-5、2-6)について評価した。この場合には、FTAでは「C<sub>1</sub>が2系統以上機能を喪失する確率」を求めることになる。

しかし、図2-3、図2-4に示したFT(「C<sub>13</sub>系統以上が機能を喪失する」)を逆に利用し、「C<sub>1</sub>が3系統以上健全である確率(信頼度)」を一旦求め、その値を1から引くことにより、非信頼度を求めるほうが容易である。(図2-15、図2-16参照)

図2-17は、1000時間までの非信頼度を、故障率の大小で比較したものある。

故障率が大きい場合(CASE2-5)には、冗長性が最も高い完全独立[4/4]のシステムの非信頼度は、50時間過ぎに完全従属[1/4]のシステムの非信頼度を上回り、さらに200時間以降は2系統分離[2/4]のシステムの非信頼度も上回る。一方、実機評価用の故障率データとした場合(CASE2-6)には、1000時間にわたって、2系統分離[2/4]のシステムの非信頼度が最も高くなることがわかった。

このように、「C<sub>14</sub>系統のうち、3系統以上が健全であれば良い」というサクセス・クライテリアのもとでは、非常用D/Gの構成上、2系統分離[2/4]のシステムの信頼性が最も悪くなる傾向にあることがわかった。

最後に、「C<sub>14</sub>系統のうち、4系統とも健全でなければならない」というように変更した場合(CASE2-7、2-8)について評価した。この場合も、図2-8~2-10に示したFT(「C<sub>14</sub>系統とも機能を喪失する」)を逆に利用し、「C<sub>1</sub>が4系統とも健全である確率(信頼度)」を一旦求め、その値を1から引くことにより、非信頼度を求めるほうが容易である。(図2-18~2-20参照)

図2-21は、1000時間までの非信頼度を、故障率の大小で比較したものある。

「C<sub>14</sub>系統とも健全でなければならない」というサクセス・クライテリアでは、故障率の大小によらず、非常用D/Gの台数のちがいによって、冗長性が最も高い完全独立[4/4]のシステムの信頼性が最も悪くなることがわかった。

以上述べてきたように、サクセス・クライテリアを厳しくするにしたがって、DHRSと非常用D/Gの構成のちがいにより、たとえ見掛け上冗長性が高くとも、コンポーネント数の影響が強く表れるようになり、信頼度は低下する傾向にあることがわかった。

なお表2-4~2-11には、FTAとDRAC02の100時間と1000時間における非信頼度を8ケース比較して示した。全てのケースにわたって、DRAC02コードの結果は、FTAの結果とはほぼ一致しており、時間区分を与えない場合でのDRAC02コードのマルコフ・モデルに関する計算手法の妥当性は、検証できたものと考える。

### c)その他

本解析のように、3種類のシステムの信頼度を評価にするあたっては、非常用D/Gの故障がシステムの故障にどれだけ依存するのかを定量的に把握することも有用である。

表2-12は、一例として完全従属[1/4]のシステムにおいて、4種類のサクセス・クライテリアに対して非常用D/Gと各系統のDHRSの真理表から、システムの故障状態を示したものである。完全従属[1/4]のシステムでは、非常用D/Gのみの故障(表の下半分;16状態)によりシステムは故障し、またDHRS側のみの故障(表の上半分:サクセス・クライテリアにより状態数が変わる)でもシステムは故障する。

この表から、非常用D/G構成からみた重要度(D/Gのような基本要素が故障状態から、正常状態になったとき、システムの故障状態はどれくらいの比率で減少するかを示す指標)を求めた。構成上の重要度は、両者におけるシステムの故障割合の差として求められ、サクセス・クライテリアが厳しくなるにつれ、非常用D/Gの構成上の重要度が小さくなる、すなわちD/G故障がシステムの故障に与える依存度が小さくなることがわかった。(図2-22)

したがって、3種類のシステムについて非常用D/G故障の影響を定量的に把握するためには、このような重要度の評価を行う必要がある。これについては、次章で検討する。

さらに実際のプラント構成を考えた場合、機器の設備容量は、系統分離により3種類とも異なる。例えば、4系統ある崩壊熱除去系の除熱容量を各システム共通とすると、それに給電する非常用D/Gの容量は、完全独立:2系統分離:完全従属 = 1:2:4となり、非常用D/G自体の重みが変わってくる。

また崩壊熱除去系と非常用D/Gの系統分離は、非常用D/Gの故障がDHRSに与える影響を小さくするためのものであるから、2系統分離から完全独立にした場合は、崩壊熱除去系の除熱容量は半減できる。その場合には、当然サクセス・クライテリアも各システムで変える必要がでてくる。

したがって、機器の設備容量の違いを故障率データ、あるいはサクセス・クライテリアに反映させた評価も、3つのシステムの信頼度をより厳密に比較する上で必要と考えられる。

### 2.3 結論

前報のテスト計算で用いた非常用D/Gから給電される強制循環除熱方式の4系統の崩壊熱除去系(DHRS)から構成されるプラントを対象として、非常用D/Gの冗長性が異なる3種類のシステム(完全独立[4/4]、2系統分離[2/4]、完全従属[1/4])の信頼度解析結果を、フォールト・ツリー解析(FTA)結果と比較し、以下の結果が得られた。

- ① 使用した故障率データ、またはサクセス・クライテリアによっては、コンポーネント数の違いが影響し、前報に示したように冗長性の高いシステムのほうが、FTAでも信頼度が低くなる場合がある。
- ② DRAC02コードの結果は、FTAの結果とほぼ一致しており、時間区分を与えない場合でのマルコフ・モデルに関する計算手法の妥当性を検証した。

表2-1 「2 out of 4」のシステムの真理表

Aループ	Bループ	Cループ	Dループ	DHRSの状態	故障確率
0	0	0	0	0	$F_A \cdot F_B \cdot F_C \cdot F_D$
0	0	0	1	0	$F_A \cdot F_B \cdot F_C \cdot (1 - F_D)$
0	0	1	0	0	$F_A \cdot F_B \cdot (1 - F_C) \cdot F_D$
0	0	1	1	1	
0	1	0	0	0	$F_A \cdot (1 - F_B) \cdot F_C \cdot F_D$
0	1	0	1	1	
0	1	1	0	1	
0	1	1	1	1	
1	0	0	0	0	$(1 - F_A) \cdot F_B \cdot F_C \cdot F_D$
1	0	0	1	1	
1	0	1	0	1	
1	0	1	1	1	
1	1	0	0	1	
1	1	0	1	1	
1	1	1	0	1	
1	1	1	1	1	

0:機能喪失 1:機能健全

表2-2 CASE2-2の故障率、修復率、起動失敗確率

項目	起動失敗確率(/demand)	故障率( $\times 10^{-6}/hr$ )	修復率(/hr)
1次系静的機器	0.0	1.3	0.0
1次系ポンプ	0.0	1.5	0.0
PRACS2次系静的機器	0.0	1.9	0.0
PRACS2次電磁ポンプ	0.0	1.0	0.0
A/Cダンパ	0.0	0.9	0.0
A/Cプロワ	0.0	0.9	0.0
PRACSの小計	0.0	7.5	0.0
D/G*	$1.0 \times 10^{-3}$	10.0	0.0

\*DRAC02、FTAともCASE①と比較するため解析上は、起動失敗確率を考慮していない。

表2-3 パラメータサーベイの解析ケース

	故障率	サクセス・クライテリア
CASE2-1	$\lambda_1 = 0.001$ $\lambda_2 = 0.002$	C <sub>14</sub> 系統中2系統以上が健全
CASE2-2	$\lambda_1 = 7.5 \times 10^{-6}$ $\lambda_2 = 1.0 \times 10^{-5}$	C <sub>14</sub> 系統中2系統以上が健全
CASE2-3	$\lambda_1 = 0.001$ $\lambda_2 = 0.002$	C <sub>14</sub> 系統中1系統以上が健全
CASE2-4	$\lambda_1 = 7.5 \times 10^{-6}$ $\lambda_2 = 1.0 \times 10^{-5}$	C <sub>14</sub> 系統中1系統以上が健全
CASE2-5	$\lambda_1 = 0.001$ $\lambda_2 = 0.002$	C <sub>14</sub> 系統中3系統以上が健全
CASE2-6	$\lambda_1 = 7.5 \times 10^{-6}$ $\lambda_2 = 1.0 \times 10^{-5}$	C <sub>14</sub> 系統中3系統以上が健全
CASE2-7	$\lambda_1 = 0.001$ $\lambda_2 = 0.002$	C <sub>14</sub> 系統中4系統が健全
CASE2-8	$\lambda_1 = 7.5 \times 10^{-6}$ $\lambda_2 = 1.0 \times 10^{-5}$	C <sub>14</sub> 系統中4系統が健全

表2-4 CASE2-1の非信頼度  
(故障率大 サクセス・クライテリアC<sub>1</sub>4系統中2系統以上が健全)

	100時間		1000時間	
	FTA	DRAC02	FTA	DRAC02
完全独立[4/4]	0.0561	0.0562	0.9861	0.9861
2系統分離[2/4]		0.0889		0.9598
完全従属[1/4]	0.1839	0.1840	0.9366	0.9366

表2-5 CASE2-3の非信頼度  
(故障率大 サクセス・クライテリアC<sub>1</sub>4系統中1系統以上が健全)

	100時間		1000時間	
	FTA	DRAC02	FTA	DRAC02
完全独立[4/4]	$4.513 \times 10^{-3}$	$4.521 \times 10^{-3}$	0.8152	0.8153
2系統分離[2/4]	0.0356	0.0356	0.8442	0.8441
完全従属[1/4]	0.1814	0.1814	0.8863	0.8863

表2-6 CASE2-5の非信頼度  
(故障率大 サクセス・クライテリアC<sub>1</sub>4系統中3系統以上が健全)

	100時間		1000時間	
	FTA	DRAC02	FTA	DRAC02
完全独立[4/4]	0.2773	0.2775	0.9995	0.9995
2系統分離[2/4]		0.3618		0.9974
完全従属[1/4]	0.2204	0.2204	0.9805	0.9805

表2-7 CASE2-7の非信頼度  
(故障率大 サクセス・クライテリアC<sub>1</sub>4系統中4系統以上が健全)

	100時間		1000時間	
	FTA	DRAC02	FTA	DRAC02
完全独立[4/4]	0.6988	0.699	0.9999	1.0
2系統分離[2/4]	0.5508	0.5509	0.9997	0.9997
完全従属[1/4]	0.4513	0.4514	0.9975	0.9975

表2-8 CASE2-2の非信頼度  
(故障率小 サクセス・クライテリアC14系統中2系統以上が健全)

	100時間		1000時間	
	FTA	DRAC02	FTA	DRAC02
完全独立[4/4]	$2.135 \times 10^{-8}$	$2.139 \times 10^{-8}$	$2.061 \times 10^{-5}$	$2.061 \times 10^{-5}$
2系統分離[2/4]		$4.250 \times 10^{-6}$		$3.964 \times 10^{-4}$
完全従属[1/4]	$9.995 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-3}$	$9.952 \times 10^{-3}$	$9.952 \times 10^{-3}$

表2-9 CASE2-4の非信頼度  
(故障率小 サクセス・クライテリアC14系統中1系統以上が健全)

	100時間		1000時間	
	FTA	DRAC02	FTA	DRAC02
完全独立[4/4]	$9.346 \times 10^{-12}$	$9.365 \times 10^{-12}$	$9.056 \times 10^{-8}$	$9.058 \times 10^{-8}$
2系統分離[2/4]	$1.00 \times 10^{-6}$	$1.001 \times 10^{-6}$	$1.001 \times 10^{-4}$	$1.001 \times 10^{-4}$
完全従属[1/4]	$9.995 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-3}$	$9.95 \times 10^{-3}$	$9.951 \times 10^{-3}$

表2-10 CASE2-6の非信頼度  
(故障率小 サクセス・クライテリアC<sub>1</sub>4系統中3系統以上が健全)

	100時間		1000時間	
	FTA	DRAC02	FTA	DRAC02
完全独立[4/4]	$1.829 \times 10^{-5}$	$1.832 \times 10^{-5}$	$1.765 \times 10^{-3}$	$1.764 \times 10^{-3}$
2系統分離[2/4]		$2.002 \times 10^{-3}$		$2.013 \times 10^{-2}$
完全従属[1/4]	$1.003 \times 10^{-3}$	$1.003 \times 10^{-3}$	$1.028 \times 10^{-2}$	$1.028 \times 10^{-2}$

表2-11 CASE2-8の非信頼度  
(故障率小 サクセス・クライテリアC<sub>1</sub>4系統中4系統が健全)

	100時間		1000時間	
	FTA	DRAC02	FTA	DRAC02
完全独立[4/4]	$6.974 \times 10^{-3}$	$6.979 \times 10^{-3}$	$6.761 \times 10^{-2}$	$6.761 \times 10^{-2}$
2系統分離[2/4]	$4.980 \times 10^{-3}$	$4.990 \times 10^{-3}$	$4.877 \times 10^{-2}$	$4.877 \times 10^{-2}$
完全従属[1/4]	$3.992 \times 10^{-3}$	$3.994 \times 10^{-3}$	$3.921 \times 10^{-2}$	$3.921 \times 10^{-2}$

表2-12 完全従属[1/4]のシステムの故障状態

D/G	DHRS Aループ	DHRS Bループ	DHRS Cループ	DHRS Dループ	サクセス 1系統以上	サクセス 2系統以上	サクセス 3系統以上	サクセス 4系統
1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	0	1	1	1	0
1	1	1	0	1	1	1	1	0
1	1	1	0	0	1	1	0	0
1	1	0	1	1	1	1	1	0
1	1	0	1	0	1	1	0	0
1	1	0	0	1	1	1	0	0
1	1	0	0	0	1	0	0	0
1	0	1	1	1	1	1	1	0
1	0	1	1	0	1	1	0	0
1	0	1	0	1	1	1	0	0
1	0	1	0	0	1	0	0	0
1	0	0	1	1	1	1	0	0
1	0	0	1	0	1	0	0	0
1	0	0	0	1	1	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	1	1	0	0	0	0
0	1	1	1	0	0	0	0	0
0	1	1	0	1	0	0	0	0
0	1	1	0	0	0	0	0	0
0	1	0	1	1	0	0	0	0
0	1	0	1	0	0	0	0	0
0	1	0	0	1	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	1	1	0	0	0	0
0	0	1	1	0	0	0	0	0
0	0	1	0	1	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	1	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0

コンポーネント側の故障

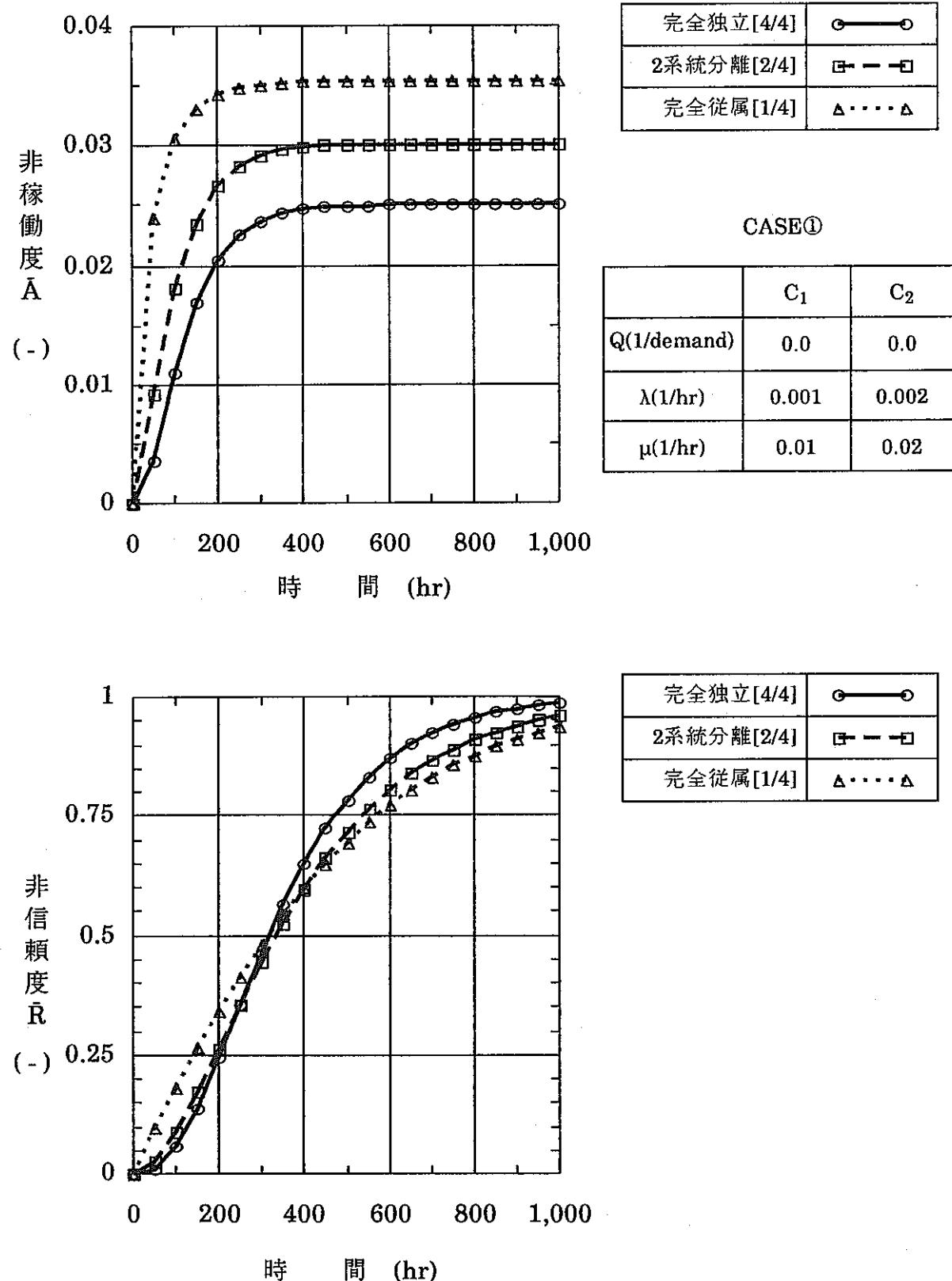
システムの故障

0:機能喪失

1:機能健全

項目	概要	
コンポーネント	[C <sub>1</sub> ] : 崩壊熱除去系 $\lambda = 0.001$ (単位:[1/hr]) [C <sub>2</sub> ] : 非常用D/G $\lambda = 0.002$	
	完全独立 [C <sub>2</sub> /C <sub>1</sub> ] 4 / 4	
システム	2系統分離 [C <sub>2</sub> /C <sub>1</sub> ] 2 / 4	
	完全従属 [C <sub>2</sub> /C <sub>1</sub> ] 1 / 4	
サクセス クライテリア	C <sub>1</sub> 4系統中2系統以上が健全	

図2-1 テスト計算でのシステム構成

図2-2 非稼働度 $\bar{A}$ 、非信頼度 $\bar{R}$ の比較

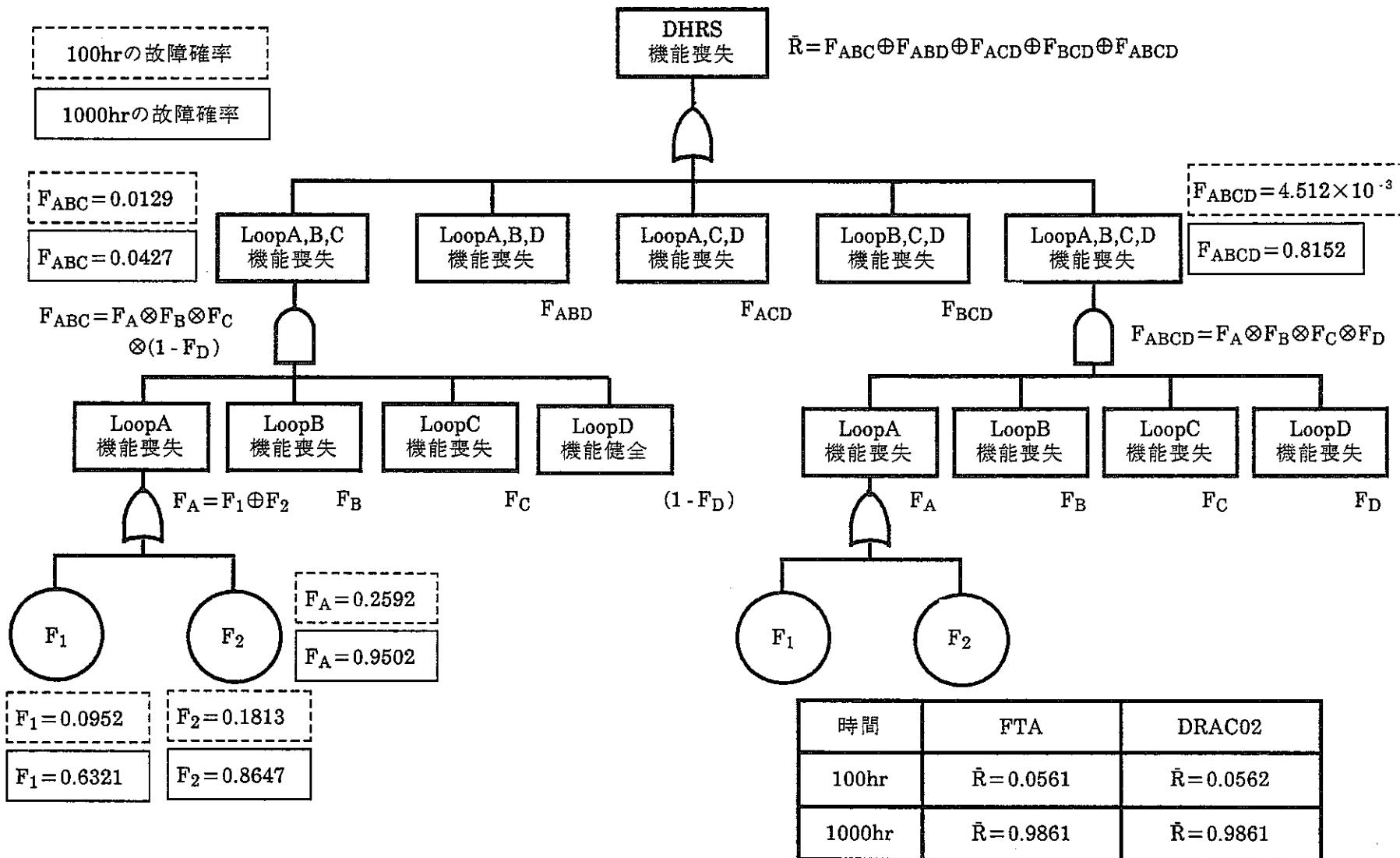


図2-3 完全独立[4/4]システムのフォルト・ツリー [CASE2-1]

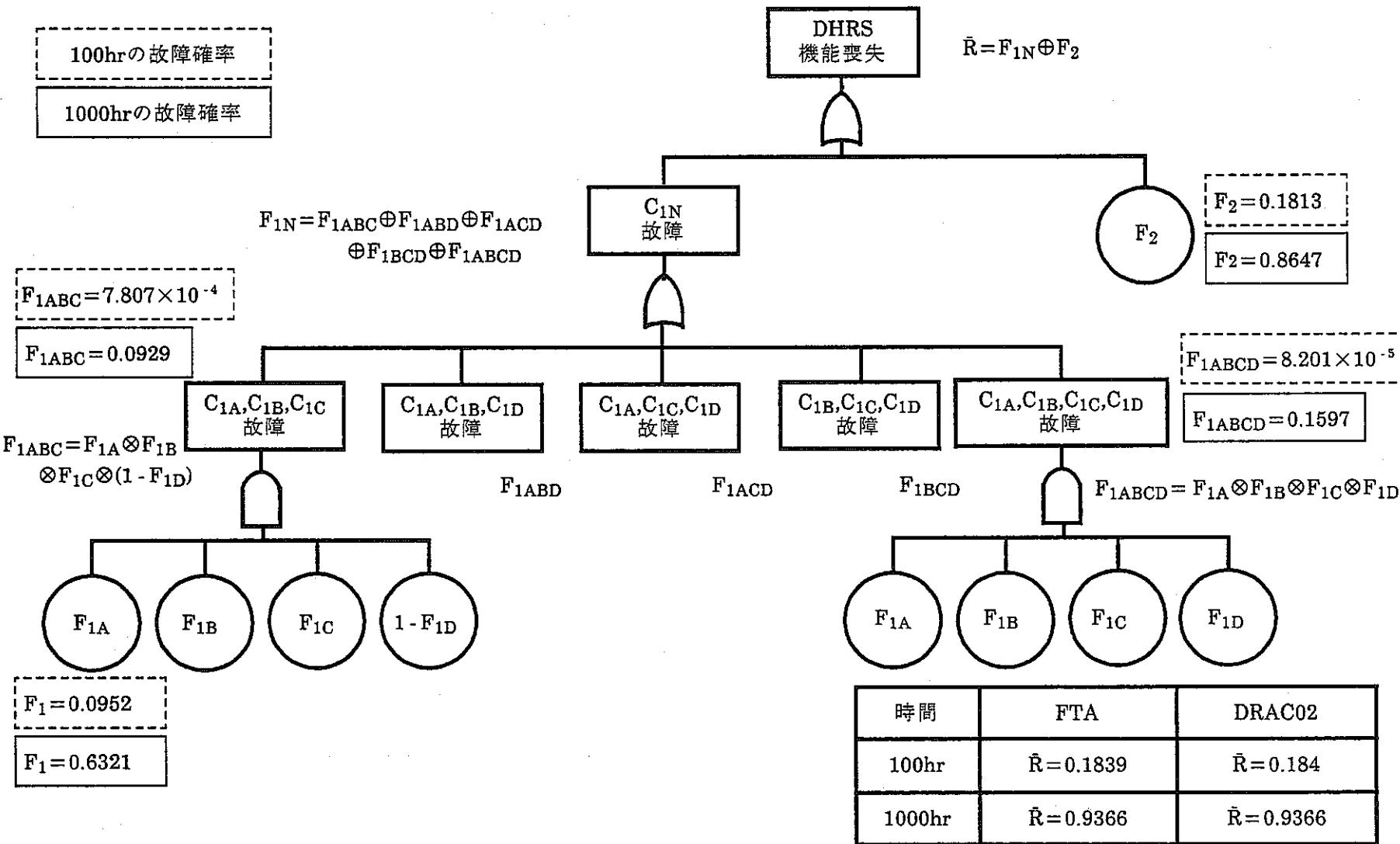


図2-4 完全従属[1/4]システムのフォルト・ツリー [CASE2-1]

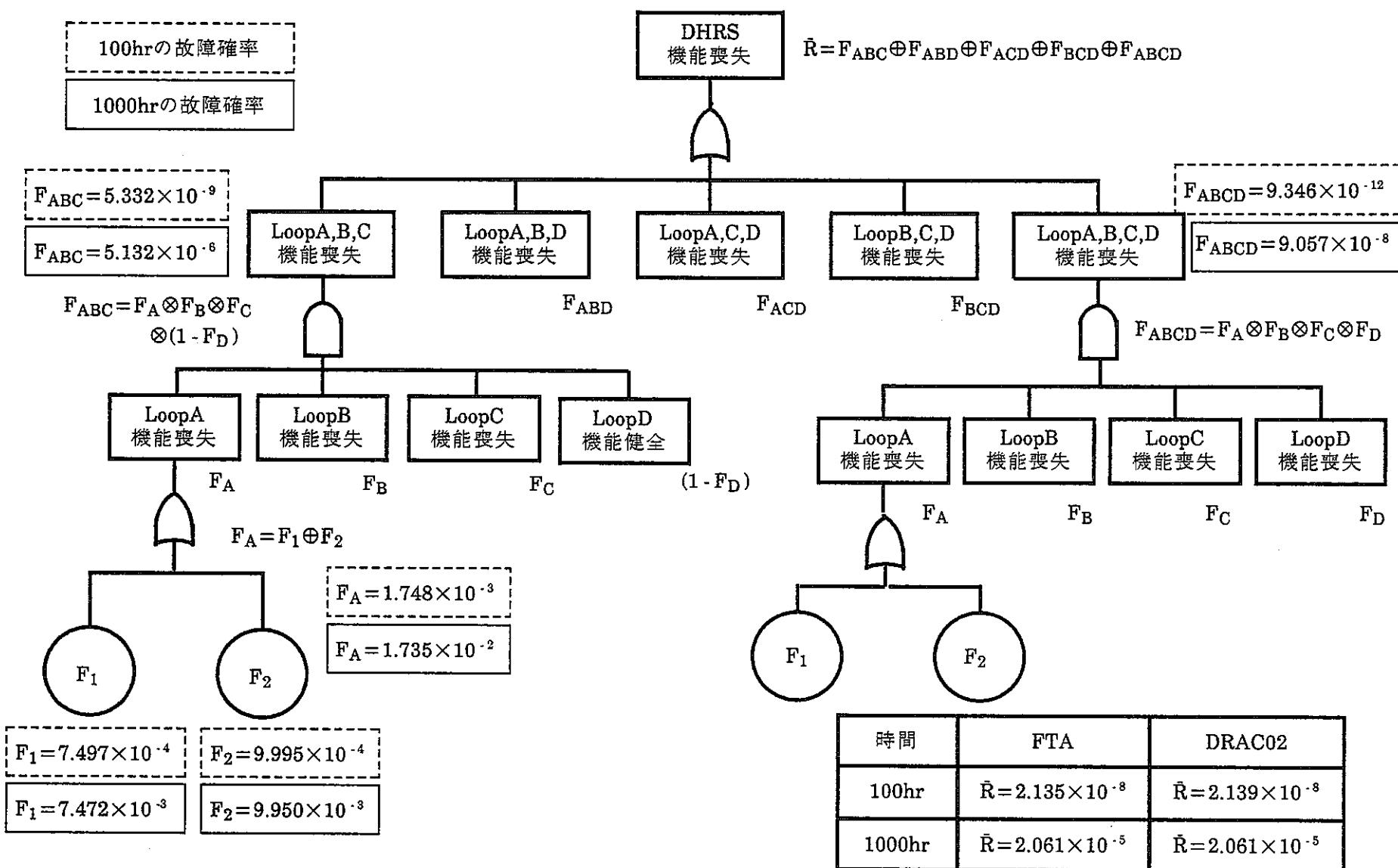


図2-5 完全独立[4/4]システムのフォルト・ツリー [CASE2-2]

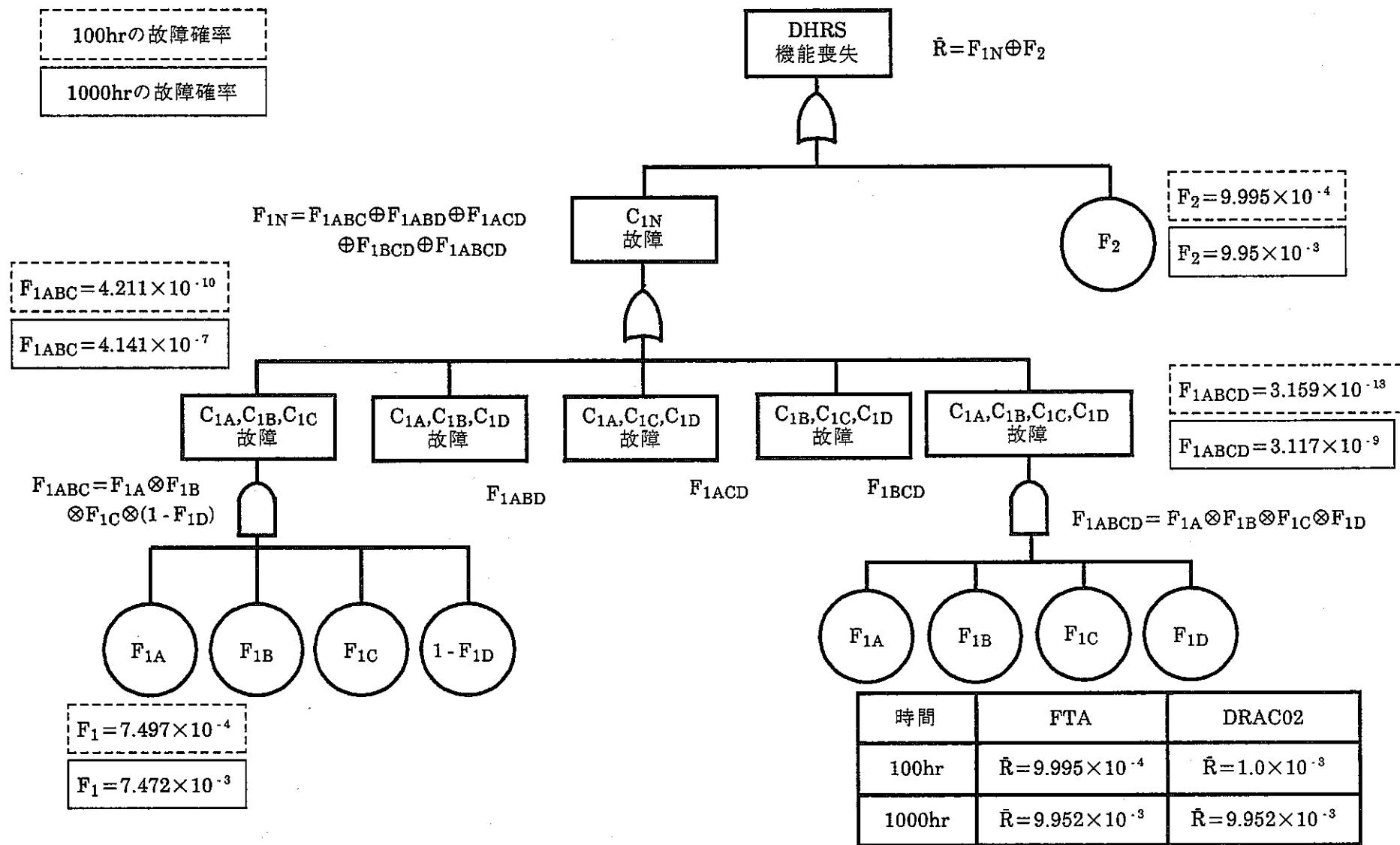


図2-6 完全従属[1/4]システムのフォルト・ツリー [CASE2-3]

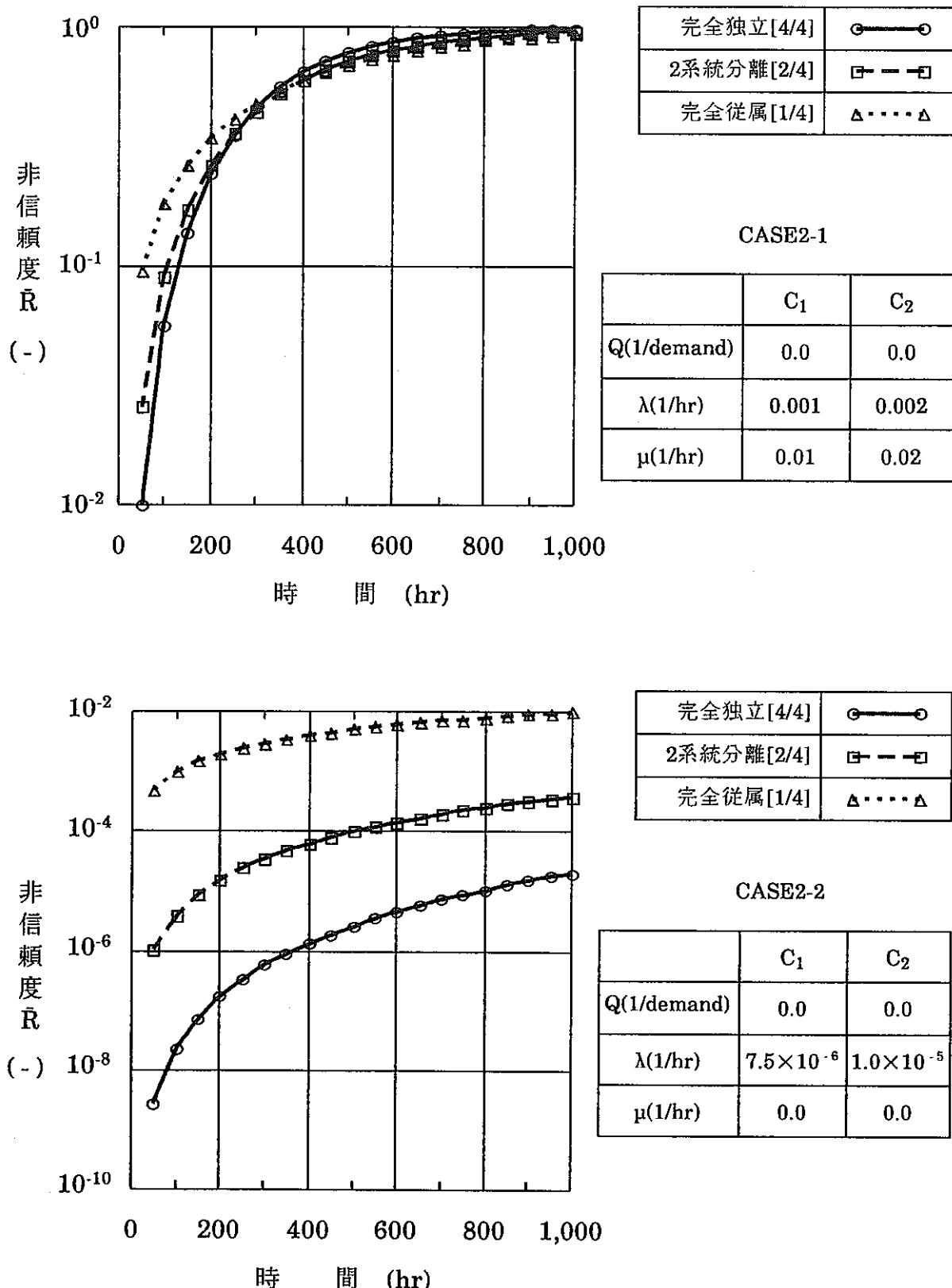


図2-7 非信頼度 $\bar{R}$ の比較(1)  
サクセス・クライテリアC<sub>1</sub>4系統中2系統以上健全

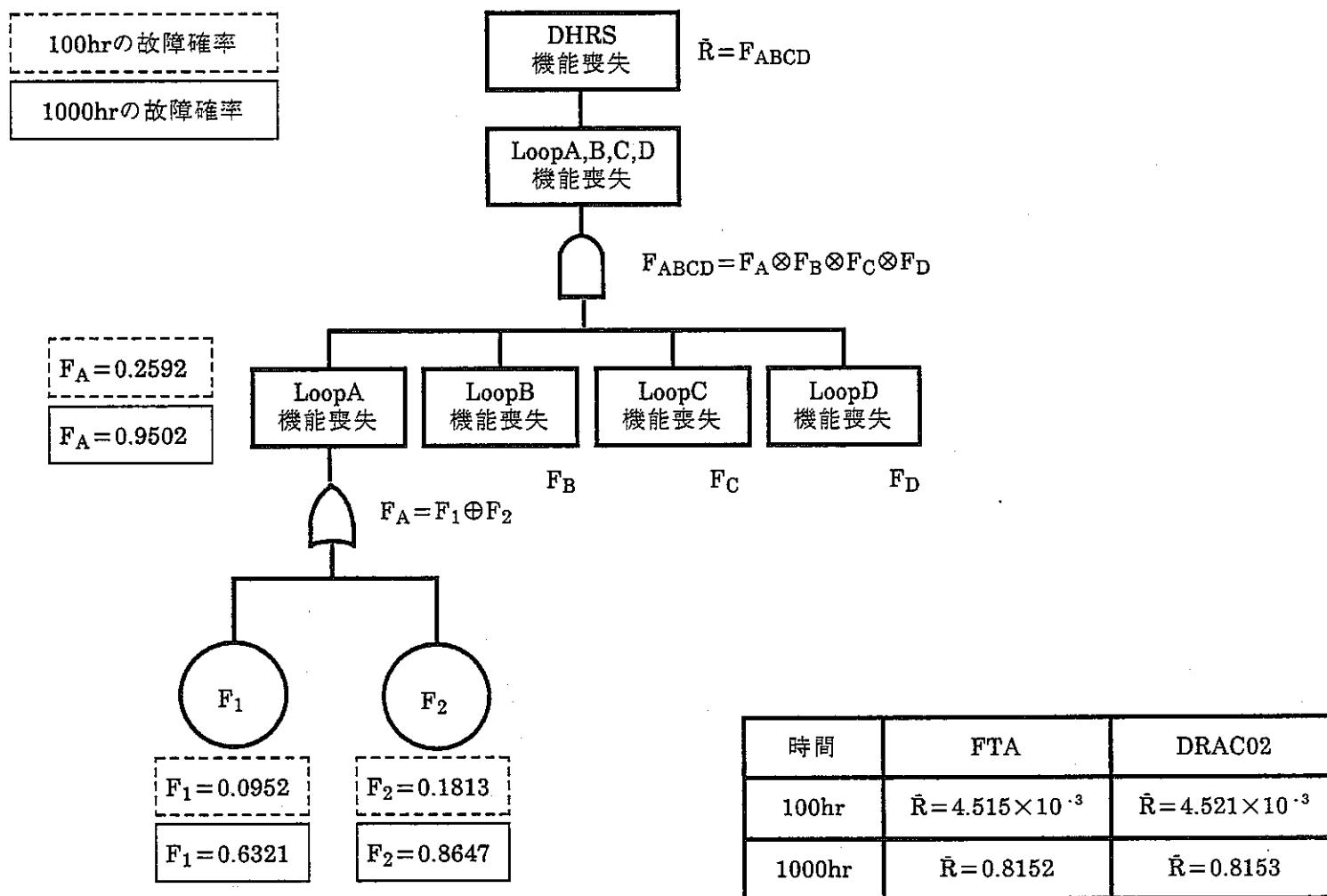


図2-8 完全独立[4/4]システムのフォルト・ツリー [CASE2-3]

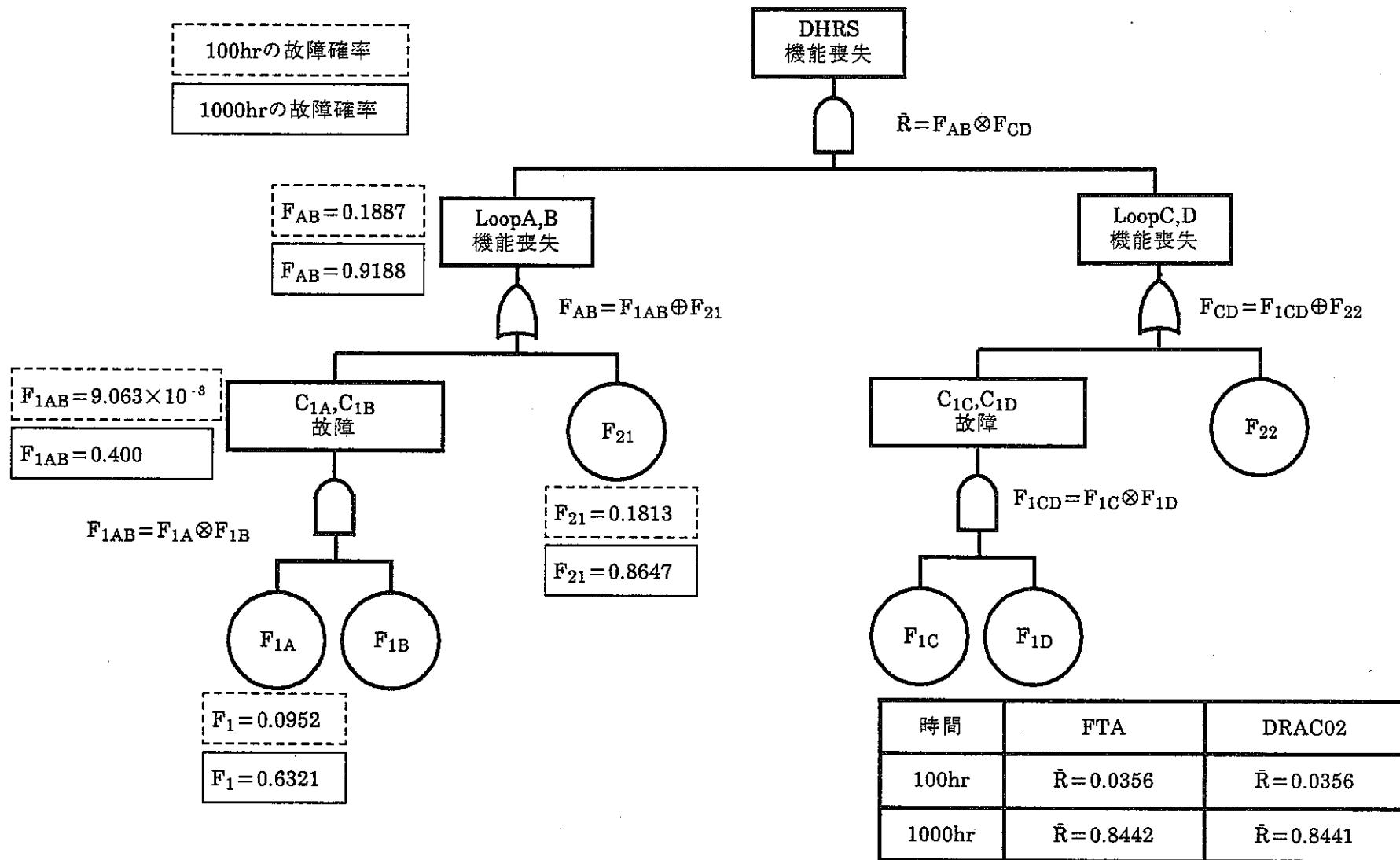


図2-9 2系統分離[2/4]システムのフォルト・ツリー [CASE2-3]

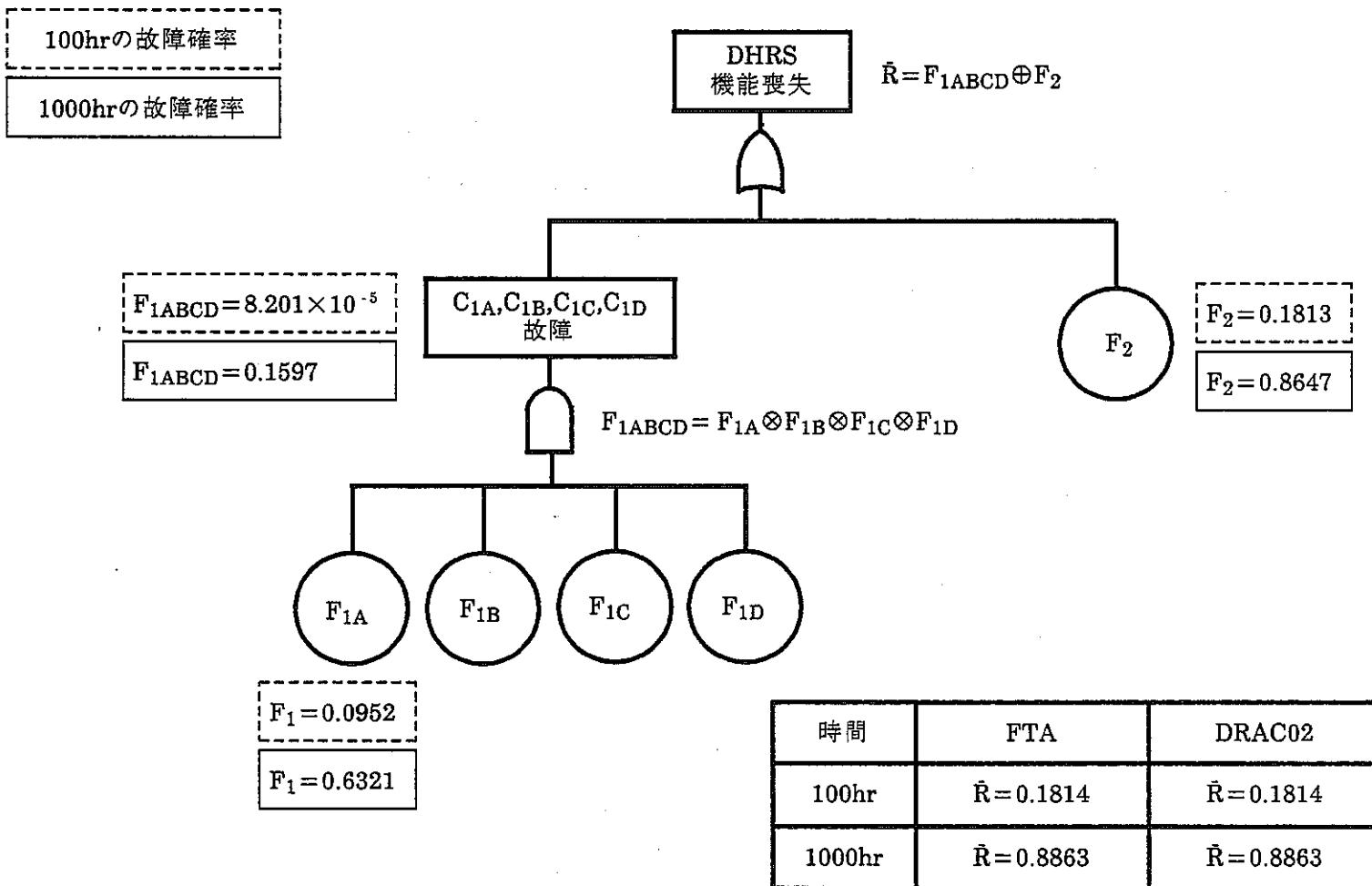


図2-10 完全従属[1/4]システムのフォルトツリー [CASE2-3]

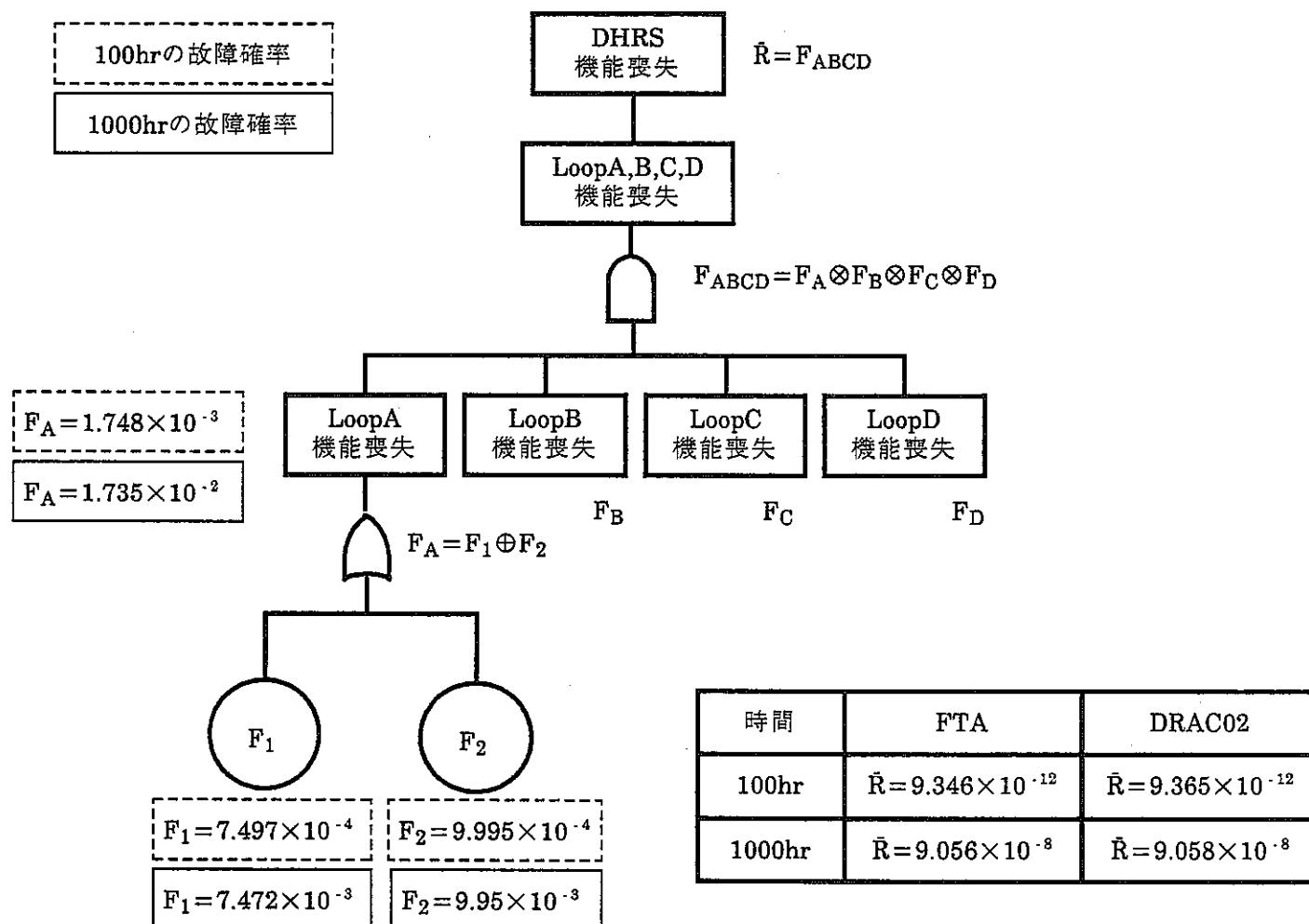


図2-11 完全独立[4/4]システムのフォルト・ツリー [CASE2-4]

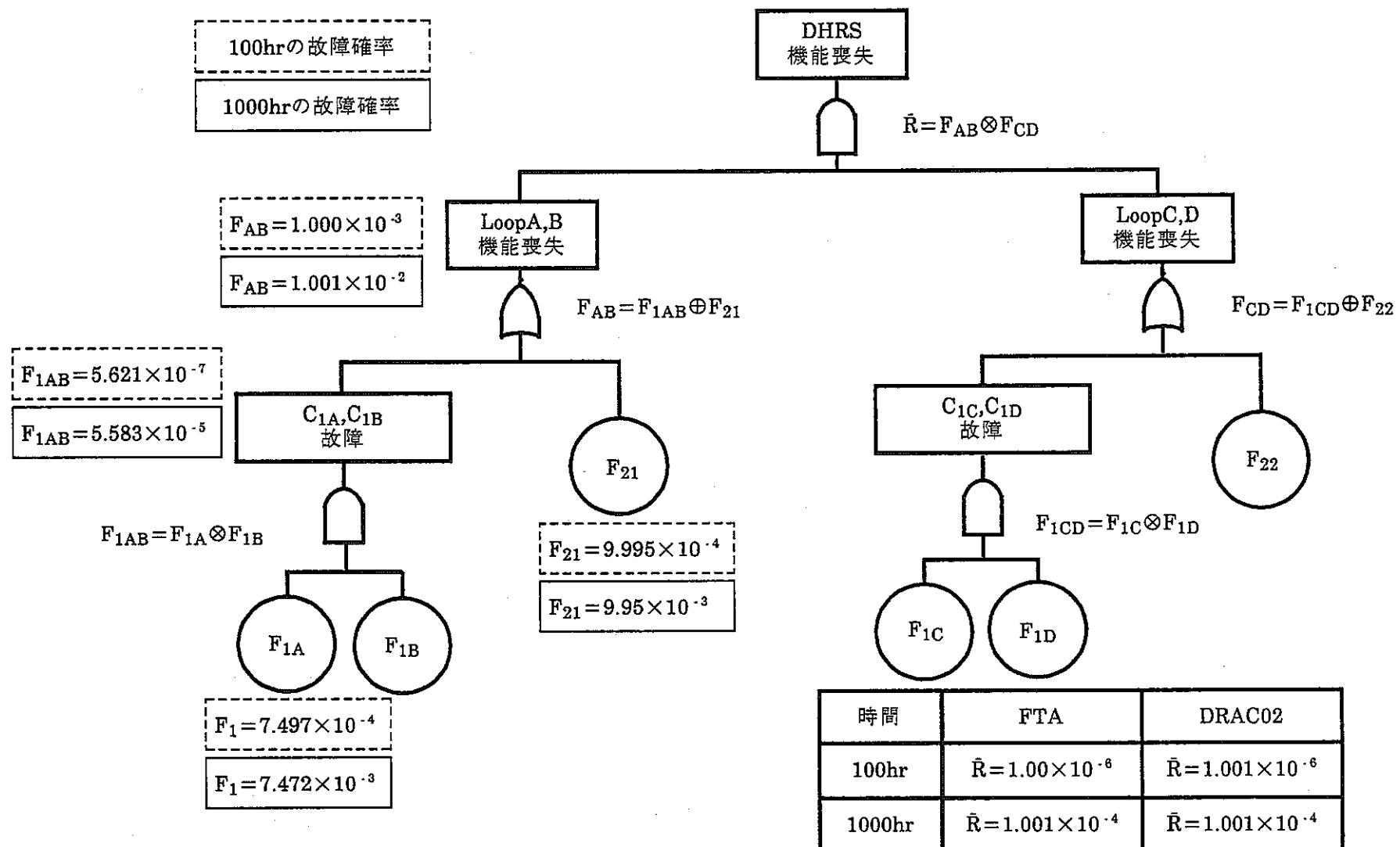


図2-12 2系統分離[2/4]システムのフォルト・ツリー [CASE2-4]

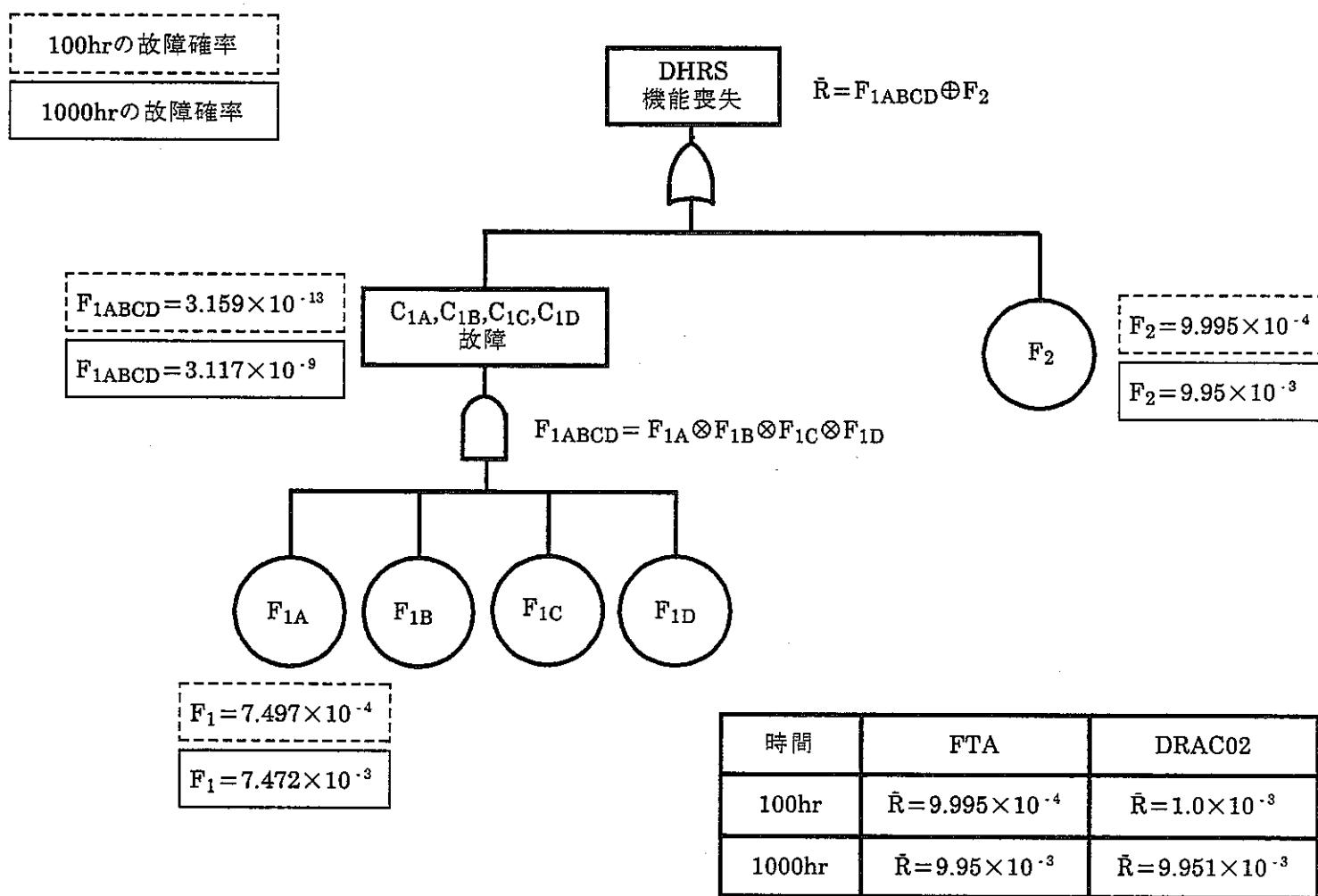


図2-13 完全従属[1/4]システムのフォルト・ツリー [CASE2-4]

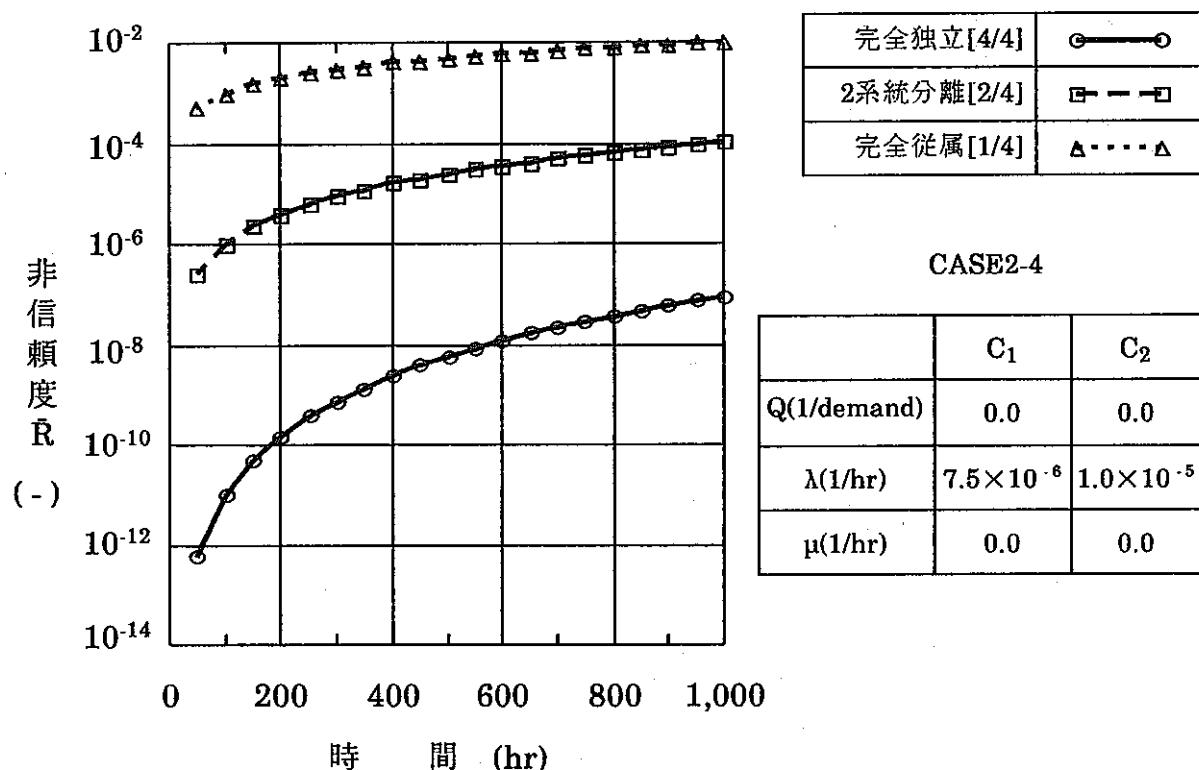
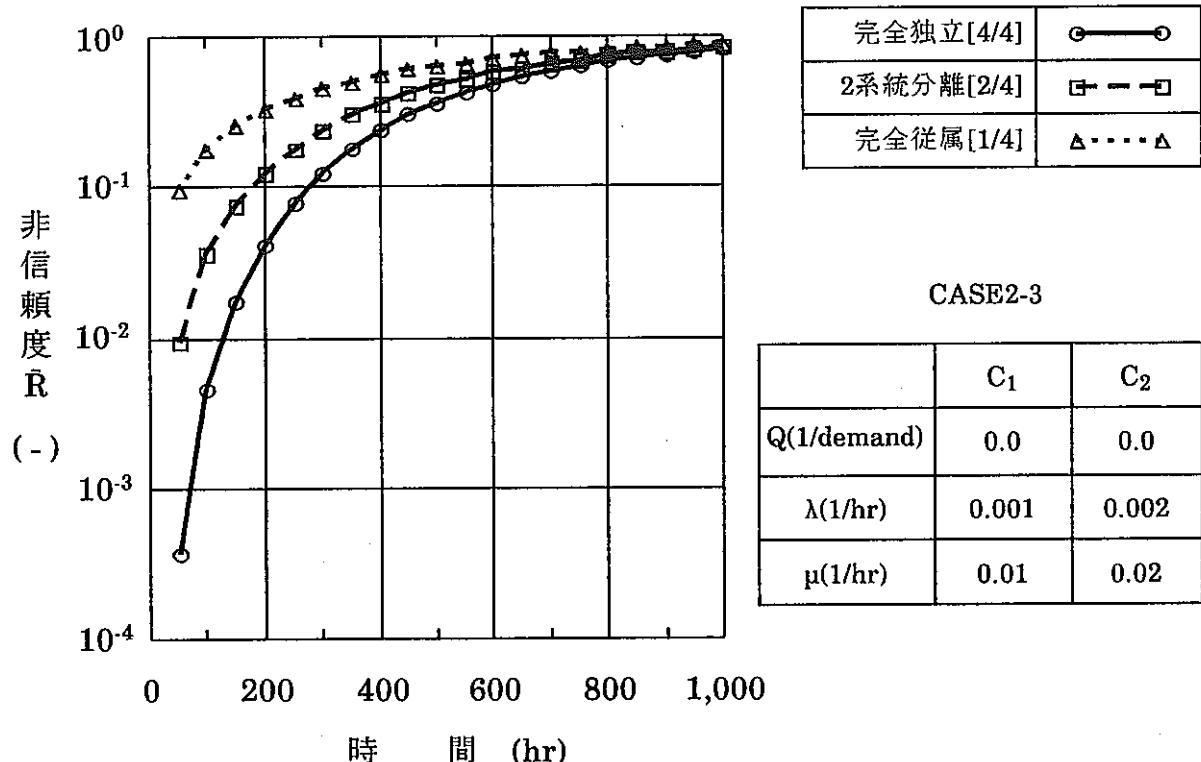


図2-14 非信頼度 $\bar{R}$ の比較(2)  
サクセス・クライテリア C14系統中1系統以上健全

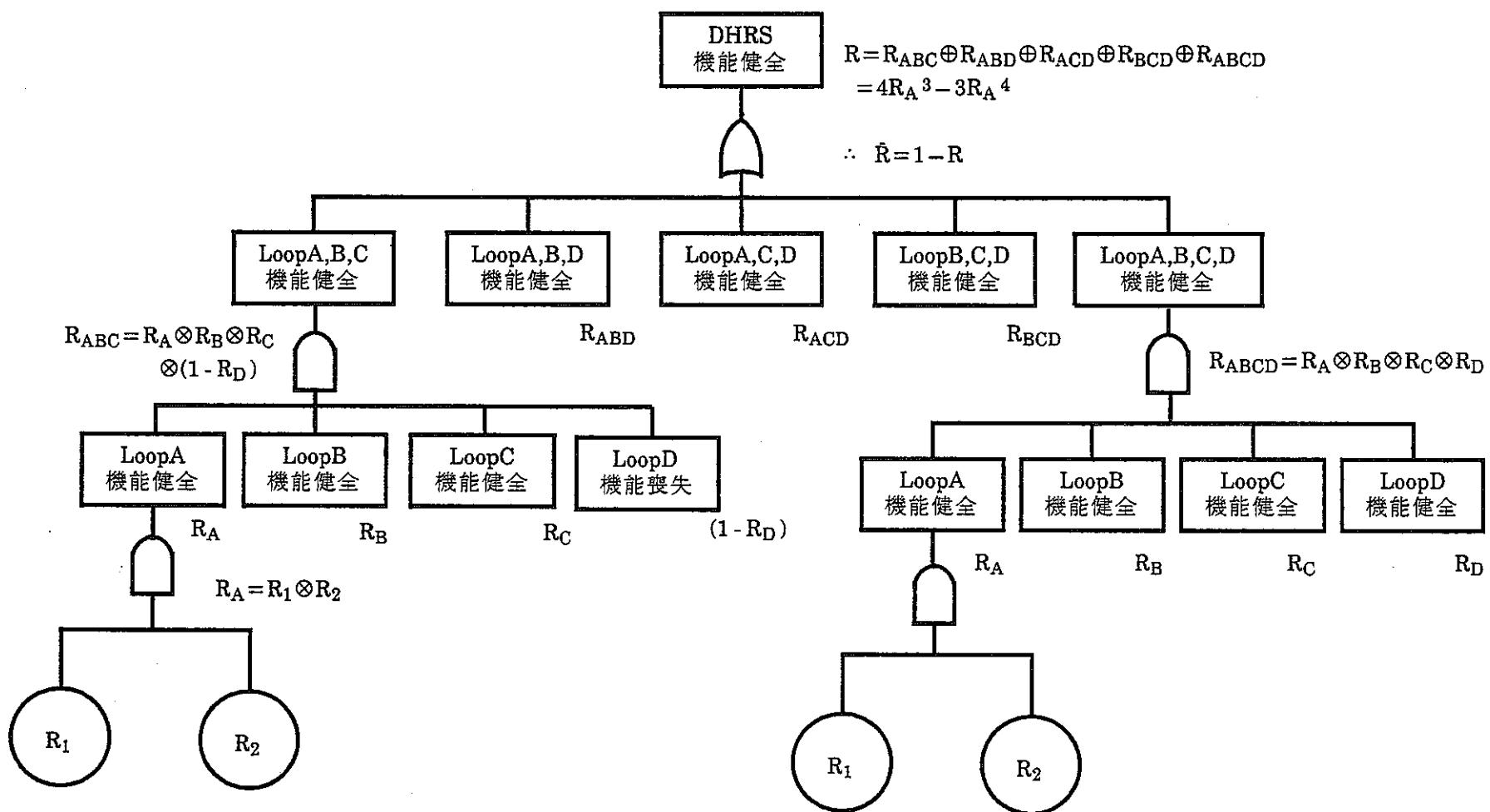


図2-15 完全独立[4/4]システムの健全確率 [CASE2-5、2-6]

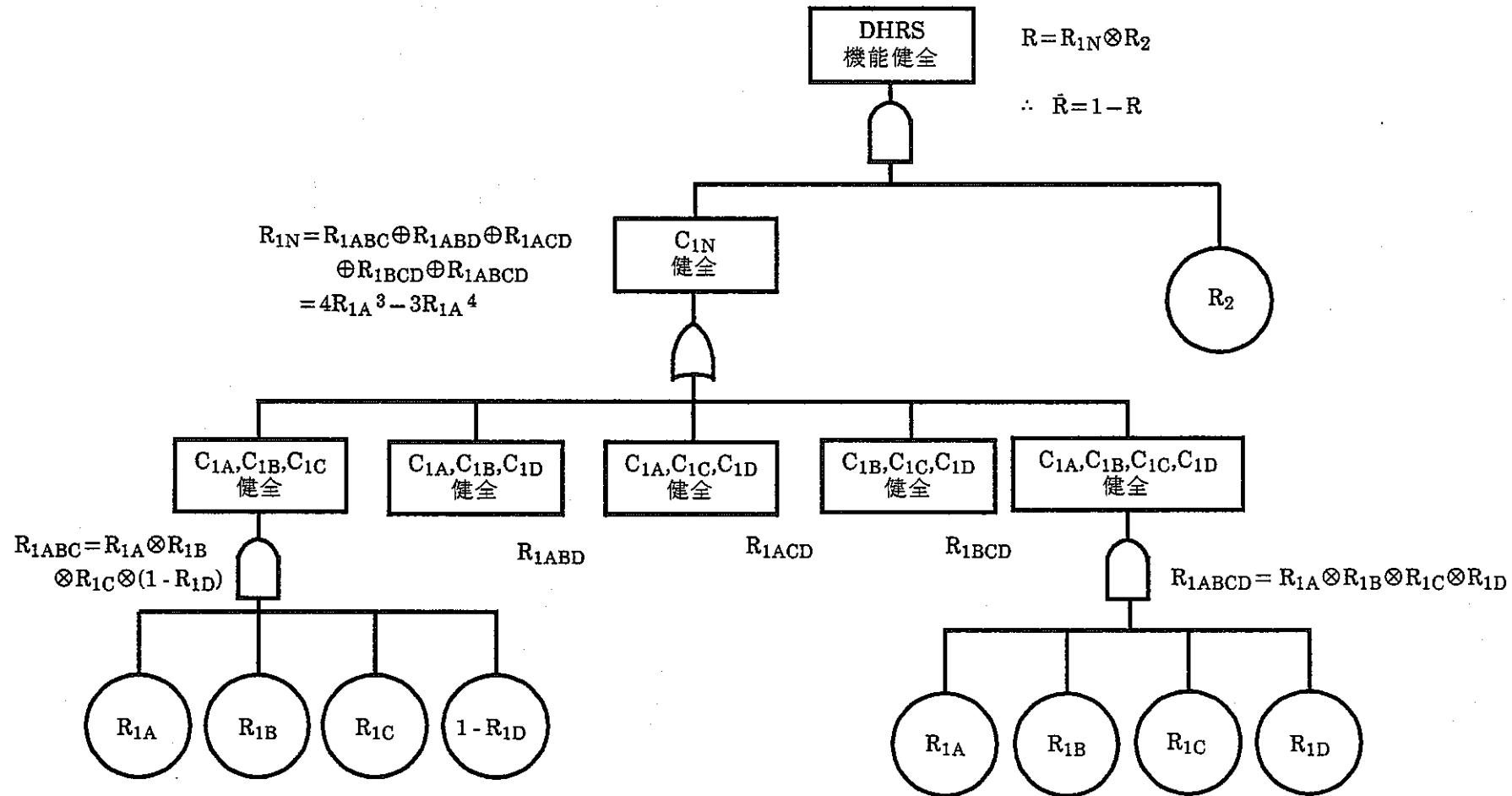


図2-16 完全従属[1/4]システムの健全確率 [CASE2-5、2-6]

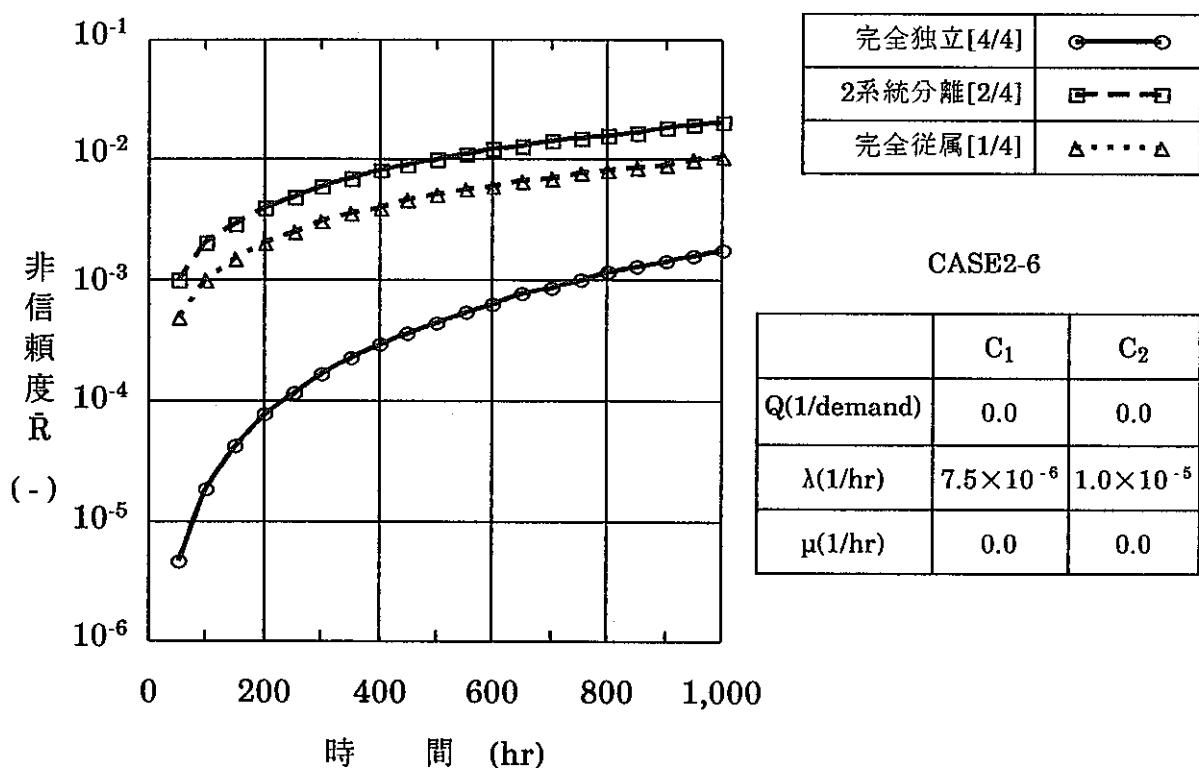
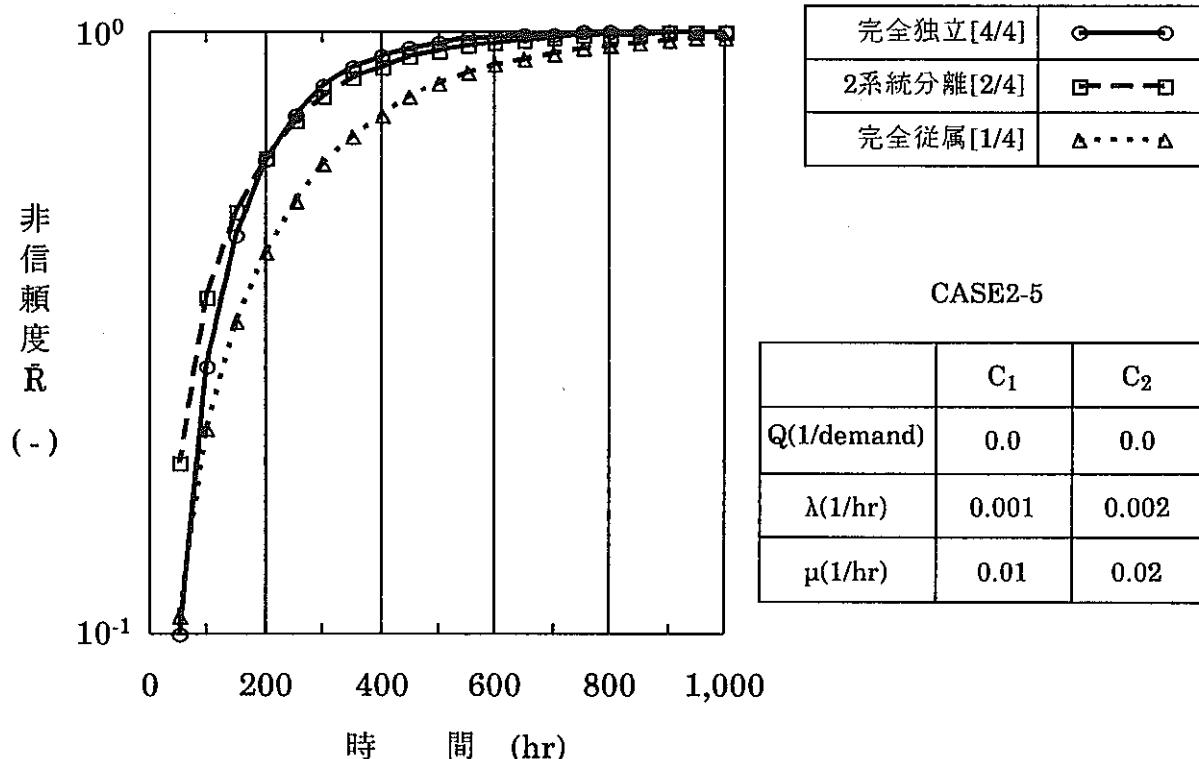


図2-17 非信頼度Rの比較(3)  
サクセス・クライテリアC<sub>1</sub>4系統中3系統以上健全

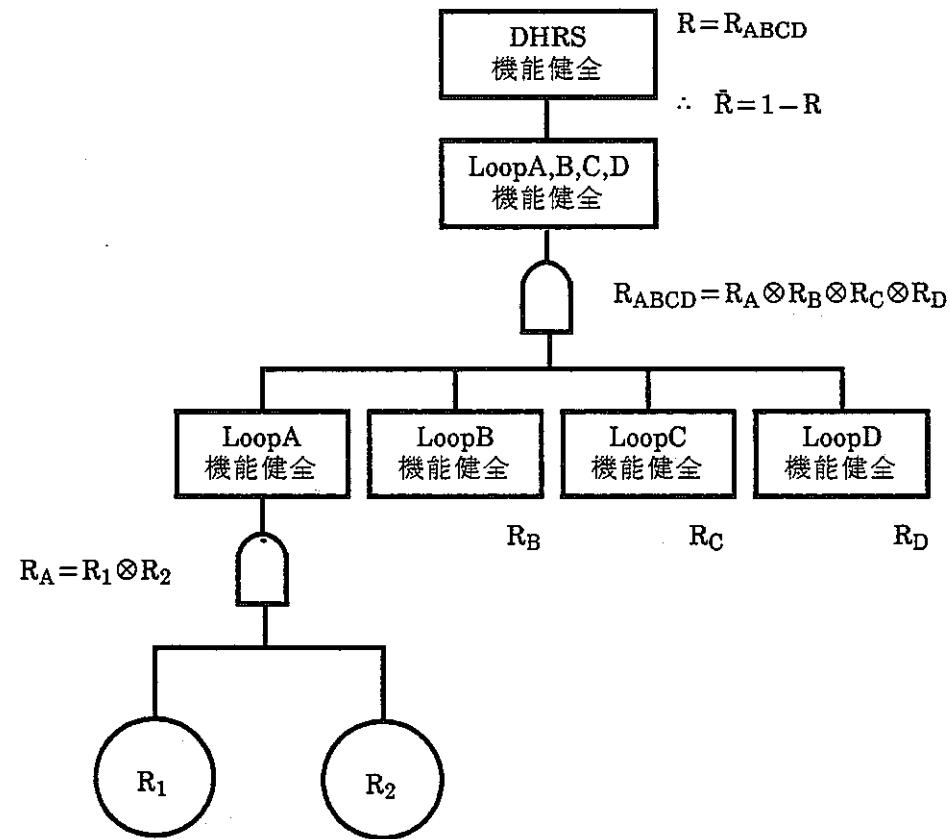


図2-18 完全独立[4/4]システムの健全確率 [CASE2-7、2-8]

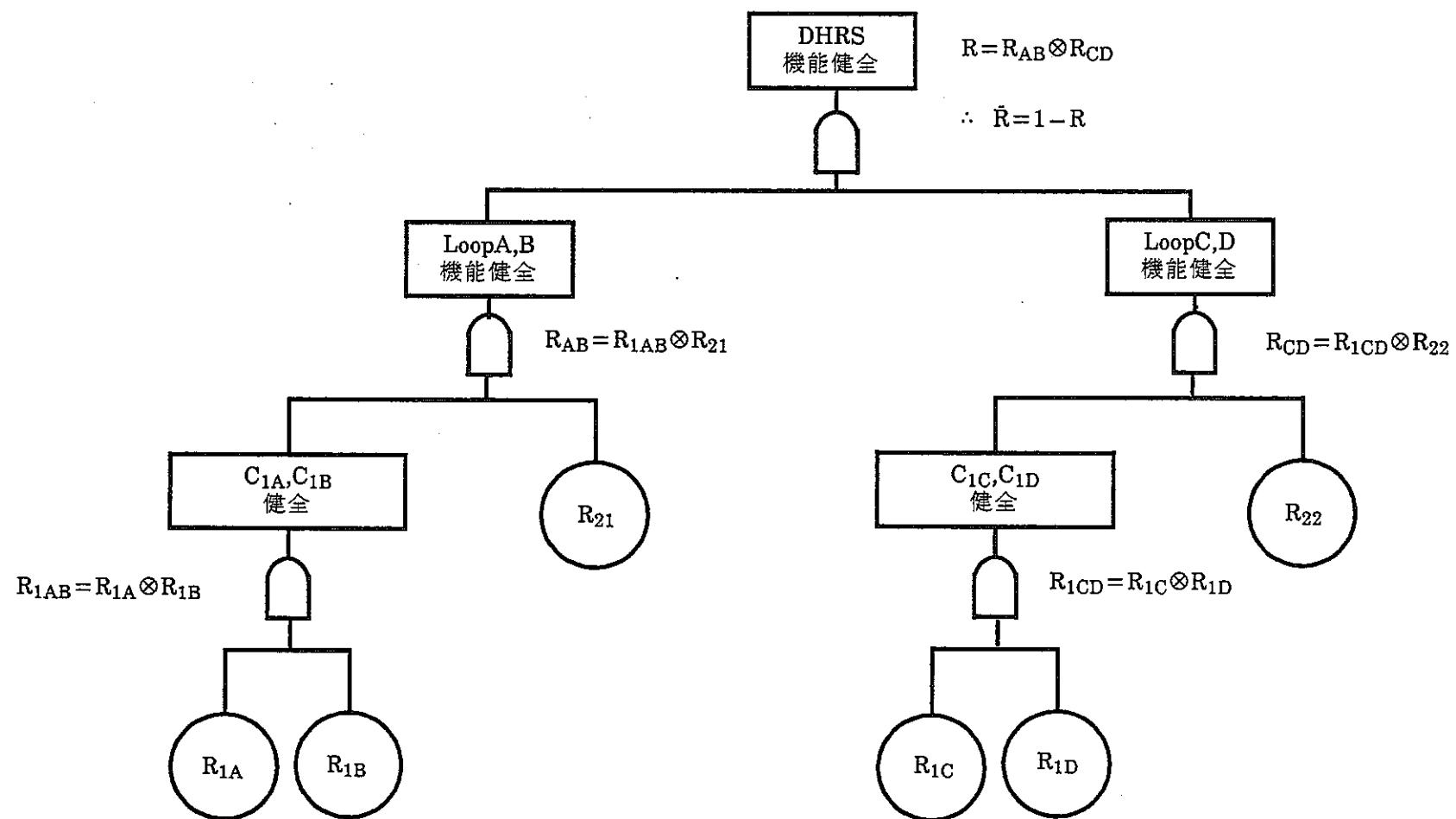


図2-19 2系統分離[2/4]システムの健全確率 [CASE2-7、2-8]

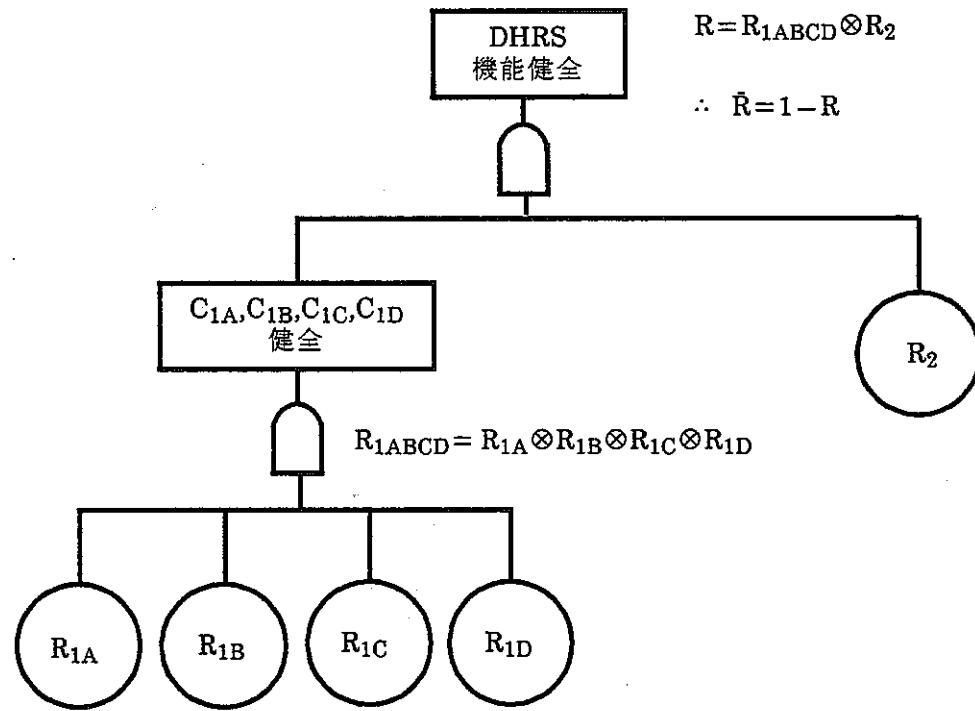


図2-20 完全従属[1/4]システムの健全確率 [CASE2-7、2-8]

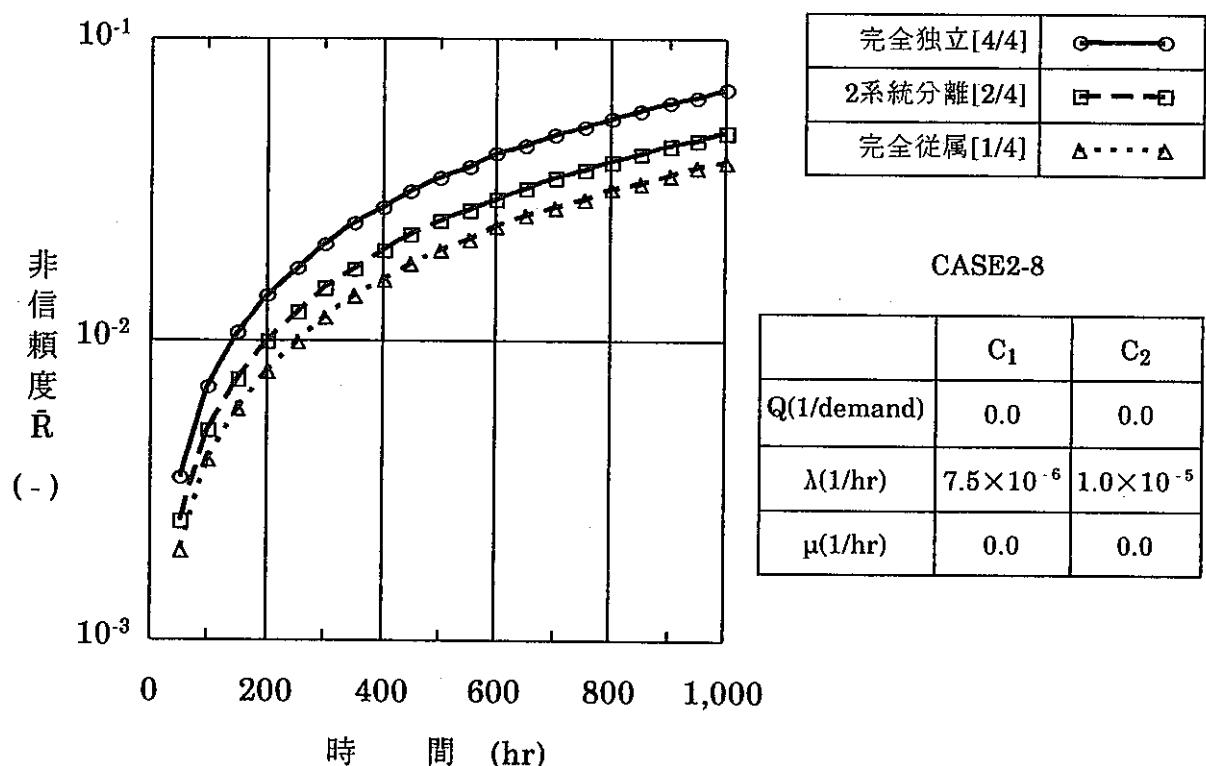
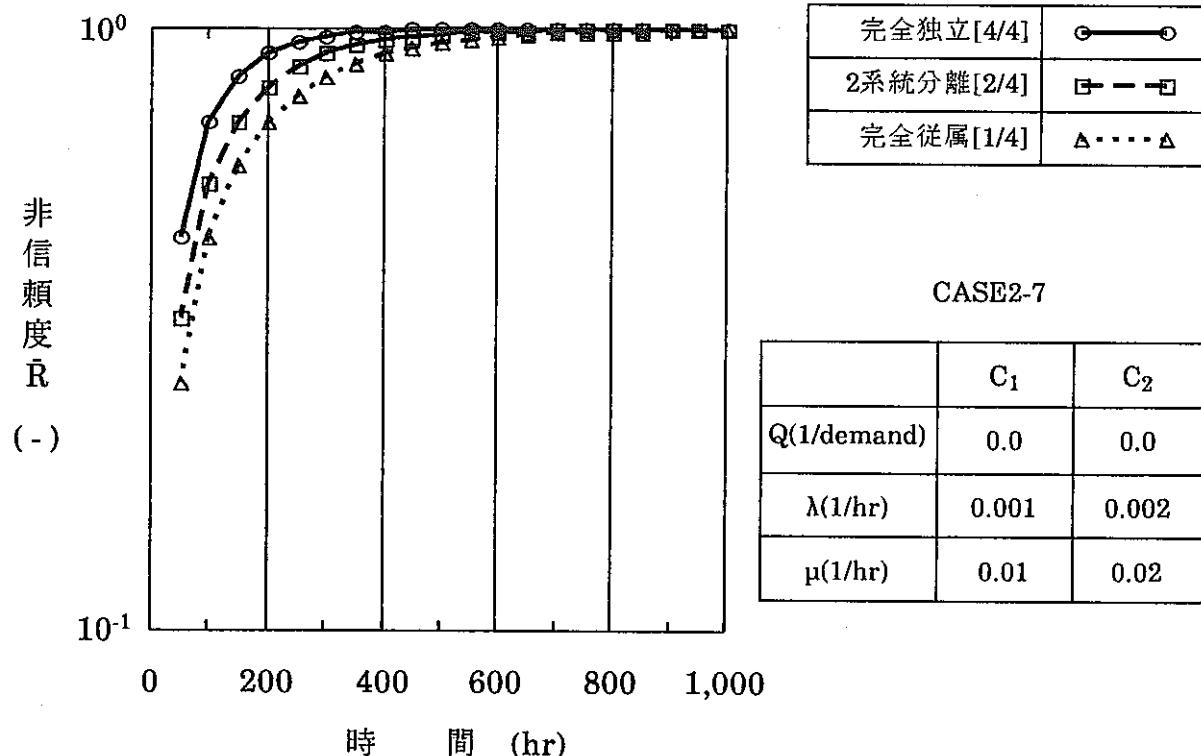
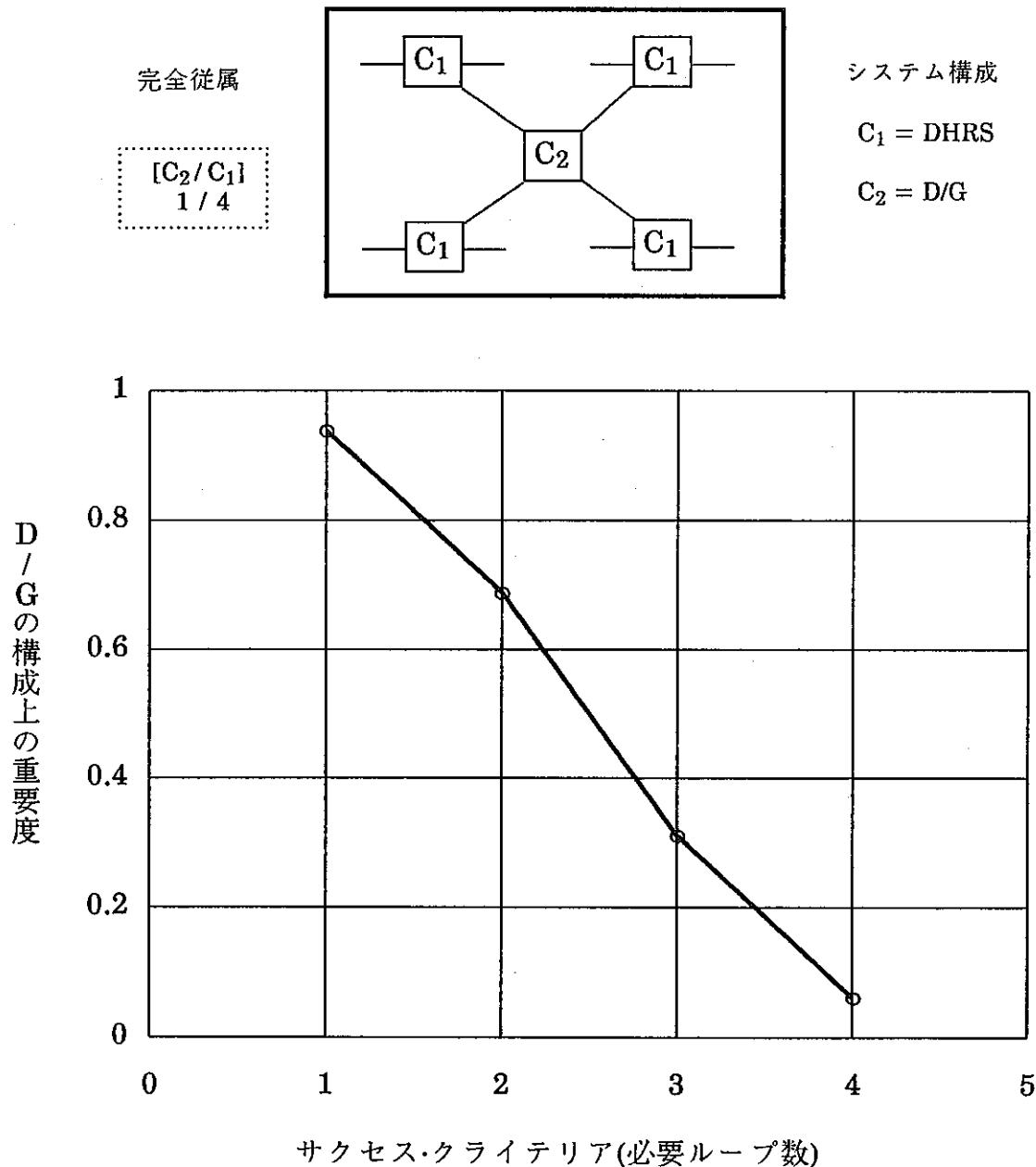


図2-21 非信頼度Rの比較(4)  
サクセス・クライテリアC<sub>14</sub>系統中4系統健全



D/Gの重要度 = D/Gの故障によるシステムの故障割合(表2-12の下半分)

- DHRS側の故障によるシステムの故障割合(表2-12の上半分)

$$\begin{aligned}
 &= 16/16 - 1/16 = 15/16 \quad [\text{サクセス・クライティア1系統以上}] \\
 &= 16/16 - 5/16 = 11/16 \quad [\text{サクセス・クライティア2系統以上}] \\
 &= 16/16 - 11/16 = 5/16 \quad [\text{サクセス・クライティア3系統以上}] \\
 &= 16/16 - 15/16 = 1/16 \quad [\text{サクセス・クライティア4系統}]
 \end{aligned}$$

図2-22 完全従属[1/4]システムにおけるD/Gの構成上の重要度

### 3. システム重要度評価

#### 3.1 概 要

前章では、図2-1に示すように非常用D/Gから給電される強制循環除熱方式の4系統の崩壊熱除去系(DHRS)から構成されるプラントを対象として、非常用D/Gの冗長性をかえた場合のシステムの信頼度をDRAC02コードにより評価した。

その結果、図3-1に示すようにサクセス・クライテリア等の影響により、非常用D/Gの冗長性の高いシステムのほうが、信頼度が低下する場合があることがわかった。

さらに、冗長性の異なるシステムの信頼度を厳密に評価するためには、系統間で共用している非常用D/G故障の重要度(非常用D/Gの故障がシステムの故障に与える影響の度合い)の評価が重要である。しかし現在のDRAC02コードには、重要度解析機能は組み込まれていない。

そこで前章での信頼度評価結果を定量的に解釈するため、本章では、米国サンディア国立研究所より導入されたシステム信頼性解析コードSETS<sup>2)</sup>、及びSETSコードの後処理用コード群の1つとして開発された重要度解析コードIMPROVE<sup>3)</sup>を用い、システムの重要度評価を通じて、冗長性の異なるシステムの信頼度評価を試みた。

また機器の故障率が低減された場合や、2系統分離[2/4]と完全従属[1/4]のシステムに非常用D/Gを付加した場合、どの程度信頼度が向上するかについてのパラメータサーベイも行った。

### 3.2 リスク減少価値とリスク増加価値

本解析においては、重要度の指標として、以下に述べるリスク増加価値とリスク減少価値を用いることとした。

ある系統のリスク増加価値(Risk Achievement Worth)とは、その系統が故障したと仮定した場合のシステム全体の非信頼度の増加の割合(即ち、その系統が担っている安全上のインポータンス)を表している。

また、リスク減少価値(Risk Reduction Worth)とはその系統の故障率を0とした場合のシステム全体の非信頼度の減少割合(即ち、その系統への安全上の追加投資価値)を表している。

(補足) 本解析で用いたIMPROVEコードでは上記の二つを含めて以下の四つの重要度を算出することができる。本解析では、解釈も容易であり、これまで利用頻度も高い後者二つの重要度を選択した。

$$\text{Fussel-Vesely Measure} = 1 - g(0_i, \underline{X}) / g(\underline{X})$$

$$\text{Birnbaum Measure} = g(1_i, \underline{X}) - g(0_i, \underline{X})$$

$$\text{Risk Achievement Worth} = g(1_i, \underline{X}) / g(\underline{X})$$

$$\text{Risk Reduction Worth} = g(\underline{X}) / g(0_i, \underline{X})$$

ここで、

$g(\underline{X})$  ; システム全体の非信頼度

$g(1_i, \underline{X})$  ; 系統*i*の故障率が1.0におけるシステム全体の非信頼度

$g(0_i, \underline{X})$  ; 系統*i*の故障率が0.0におけるシステム全体の非信頼度

### 3.3 解析方法

①サクセス・クライテリアは、各システム構成ともに非常用D/Gの故障を想定しても、崩壊熱除去系4系統のうち1系統以上~4系統が健全であることとした。

②まず上記のサクセス・クライテリアに基づいて、各システムのフォールトツリーを作成し、SETSコードにより、表3-1に示すミニマルカットセットを導出した。また、前章の表2-2に示したPRACS評価用の故障率を与え、表3-2に示す非信頼度を算出した。

③次にSETSコード出力のミニマルカットセットを、IMPROVE1コードの入力として各コンポーネント(非常用D/G[DG1,DG2,DG3,DG4]、崩壊熱除去系[C1,C2,C3,C4])の重要度を算出した。

### 3.4 重要度評価結果

#### (1)システム構成とサクセス・クライテリアの影響

表3-3～表3-5に、IMPROVE1コードの解析結果を示す。システム構成とサクセス・クライテリアが変化すると、表3-3に示すように、非常用D/G故障の重要度プロファイルに変化がみられ、以下にその傾向を述べる。(表3-3の斜線部が、非常用D/Gの重要度を表している。)

まず全般的な傾向としては、以下の2点が挙げられる。

①非常用D/G1台あたりのリスク増加価値、リスク減少価値は、冗長性を高めるにつれ低下する。即ち、非常用D/G1台あたりの重要度が低下し、システム故障への影響が小さくなる。

②また非常用D/G1台あたりのリスク増加価値、リスク減少価値は、サクセス・クライテリアが「DHRS1系統以上が健全」→「DHRS4系統が健全」と厳しくなるに従って低下する。この結果は、前章での完全従属[1/4]のシステムを対象とした非常用D/G構成からみた重要度評価結果(表2-12、及び図2-22)と同じ傾向を示す。

また3種類のシステムの特性は、次のようになっている。

③完全独立[4/4]のシステムでは、非常用D/GとDHRSのリスク増加価値は等しい。即ち、非常用D/Gの故障もDHRSの故障も、システム故障へ与える影響は同程度である。またリスク減少価値はほとんど変わらず、これ以上の追加投資(非常用D/Gの増設)は意味がない。

④2系統分離[2/4]のシステムでは、サクセス・クライテリアが「DHRS1系統以上が健全」と「DHRS3系統以上が健全」のときには、非常用D/Gのリスク増加価値がDHRSに比べ大きくなっている。その従属性が特徴づけられる。またサクセス・クライテリアが「DHRS1系統以上が健全」の場合では、非常用D/Gのリスク減少価値が $1.63E+3$ と大きく、非常用D/Gを1台増設すれば信頼度がかなり向上することが期待できる。

しかし、サクセス・クライテリアが「DHRS2系統以上が健全」と厳しくなった場合には、非常用D/G1台増設のメリットは大きくない。

⑤完全従属[1/4]のシステムでは、サクセス・クライテリアが「DHRS4系統が健全」の場合を除き、非常用D/Gのリスク増加価値は、DHRSのリスク増加価値に比べ900倍程度大きくなる。

また非常用D/Gのリスク減少価値は、サクセス・クライテリアが「DHRS3系統以上が健全」の場合まで、非常用D/G増設のメリットが大きい。したがって、完全従属[1/4]のシステムの故障は、非常用D/Gの故障にはほとんど支配されていることがわかる。

## (2)故障率の低減効果、及び非常用D/G増設の効果\*

機器の故障率が低減できれば、当然システム全体の信頼度は向上する。また表3-5に示したリスク減少価値より、2系統分離[2/4]と、完全従属[1/4]のシステムでは非常用D/Gを追加すればシステム全体の信頼度は向上することがわかった。

そこで、この2つのパラメータを変えた場合、システムの信頼度がどの程度向上するかについて、SETSコードを用いて非信頼度を定量的に評価した。

まず表3-6、3-7は、非常用D/G、及びDHRSの故障率が一桁低減された場合の非信頼度を示したものである。なお( )内の数値は、表3-2に示した非信頼度を、故障率が一桁低減された場合の非信頼度で除した値である。この値は機器の故障率低減によるシステム信頼性向上の指標と考えることができる。これより、DHRSの故障率よりも非常用D/Gの故障率を低減させたほうが、システムの信頼度をより向上できることがわかる。

またD/G故障率一桁低減の効果が、サクセス・クライテリアが「DHRS1系統以上が健全」のときにおいて2系統分離[2/4]が最も大きく、完全従属[1/4]が小さいこともわかる。これは、D/G1台あたりのR.R.WとR.A.Wでは後者のほうが大きな傾向にあるものの、表3-1のミニマルカットセットから明らかなように、後者がD/G故障の1次の項に、前者が2次の項に支配されているためである。その他のサクセス・クライテリアにおいては、三つのシステム間に大きな差はみられていない。このようにD/Gの故障率を一桁低減させることができれば、そのことによって各システムとともに系全体の信頼性を概ね一~二桁向上させ得ることがわかった。

次に表3-8、3-9は、2系統分離[2/4]と、完全従属[1/4]のシステムで非常用D/Gを追加した場合の非信頼度を示したものである。( )内の数値は、表3-2に示した通常ケースの非信頼度を、非常用D/Gを追加した場合の非信頼度で除した値である。この値はすなわちD/Gの追加投資価値を表しており、表3-5に示したリスク減少価値がさらに具体的な数値で裏付けられた。

ここで非常用D/Gの台数について着目して各システムを比較すると、概ね以下のことが言える。同じD/Gの台数で比較すると、従属性の大きなシステムにD/Gを付加したもののはうが、従属性の小さいシステムよりも信頼性が高い。例えばD/G3台では、2系統分離[2/4]+D/G1台よりも完全従属[1/4]+D/G2台の方が信頼度が大きく、さらに後者はD/G4台の完全独立[4/4]よりも信頼度が大きい(サクセス・クライテリアが「DHRS1系統以上が健全」の場合を除く)。この知見は、D/Gの容量と故障率の関係、及び共通原因故障を考慮した定量的評価が行われて初めて意味をもつものではあるが、冗長性が異なるシステムの信頼性の特徴を明らかにする意味で有用であろう。

(\* システム全体の信頼度は、そのシステムを構成する機器の接続形態と個々の機器の故障率等によって決定されるので、機器の故障率を低減させることはシステム全体の信頼性をある程度向上させ得る。しかしながら、機器の故障率はデータベースから決定されるものであり、その向上にはおのずと限界がある。そこで、そのような信頼性向上方策によってもシステムの信頼性が基準を満足しない場合には、機器の付加等による信頼性向上方策の検討が必要となる。)

### 3.5 結論

非常用D/Gから給電される強制循環除熱方式の4系統の崩壊熱除去系(DHRS)から構成され、非常用D/Gの冗長性が異なる3種類のシステム構成(完全独立[4/4]、2系統分離[2/4]、完全従属[1/4])を対象に、SETSコード、及びIMPROVEコードを用いて、システムの重要度を評価した。

この結果、各システムにおける信頼性向上方策が明らかになった。さらに従属する非常用D/Gの故障がシステム故障に与える影響の大きさを、リスク増加価値、リスク減少価値のプロファイルの変化として、定量的・視覚的に把握できた。また前章でのDRAC02コードの信頼度解析結果が、この重要度評価によりさらに信頼性の観点からみたシステム特性が明確になった。

なお3種類のシステムの信頼度を厳密に比較するには、系統分離による機器の設備容量の違いを故障率データ、あるいはサクセス・クライテリアに反映した評価、また今回は考慮していない共通原因故障の取扱いが、今後の課題として残されている。

表3-1 ミニマルカットセット

	完全独立[4/4]	2系統分離[2/4]	完全従属[1/4]
DHRS4系統中 1系統以上が健全	$\text{TOP} = \text{D/G4重故障(1ヶ)}$ $+ \text{D/G3重} \times \text{DHRS(4ヶ)}$ $+ \text{D/G2重} \times \text{DHRS2重(6ヶ)}$ $+ \text{D/G} \times \text{DHRS3重(4ヶ)}$ $+ \text{DHRS4重故障(1ヶ)}$	$\text{TOP} = \text{D/G2重故障(1ヶ)}$ $+ \text{D/G} \times \text{DHRS2重(2ヶ)}$ $+ \text{DHRS4重故障(1ヶ)}$	$\text{TOP} = \text{D/G故障(1ヶ)}$ $+ \text{DHRS4重故障(1ヶ)}$
DHRS4系統中 2系統以上が健全	$\text{TOP} = \text{D/G3重故障(4ヶ)}$ $+ \text{D/G2重} \times \text{DHRS(12ヶ)}$ $+ \text{D/G} \times \text{DHRS2重(12ヶ)}$ $+ \text{DHRS3重故障(4ヶ)}$	$\text{TOP} = \text{D/G2重故障(1ヶ)}$ $+ \text{D/G} \times \text{DHRS(4ヶ)}$ $+ \text{DHRS3重故障(1ヶ)}$	$\text{TOP} = \text{D/G故障(1ヶ)}$ $+ \text{DHRS3重故障(4ヶ)}$
DHRS4系統中 3系統以上が健全	$\text{TOP} = \text{D/G2重故障(6ヶ)}$ $+ \text{D/G} \times \text{DHRS(12ヶ)}$ $+ \text{DHRS2重故障(6ヶ)}$	$\text{TOP} = \text{D/G故障(2ヶ)}$ $+ \text{DHRS2重故障(6ヶ)}$	$\text{TOP} = \text{D/G故障(1ヶ)}$ $+ \text{DHRS2重故障(6ヶ)}$
DHRS4系統中 4系統が健全	$\text{TOP} = \text{D/G故障(4ヶ)}$ $+ \text{DHRS故障(4ヶ)}$	$\text{TOP} = \text{D/G故障(2ヶ)}$ $+ \text{DHRS故障(4ヶ)}$	$\text{TOP} = \text{D/G故障(1ヶ)}$ $+ \text{DHRS故障(4ヶ)}$

表3-2 非信頼度の比較(1)

SETSコード算出値

	完全独立[4/4]	2系統分離[2/4]	完全従属[1/4]
DHRS4系統中 1系統以上が健全	$9.36 \times 10^{-12}$	$1.00 \times 10^{-6}$	$1.00 \times 10^{-3}$
	$9.21 \times 10^{-8}$	$1.00 \times 10^{-4}$	$9.95 \times 10^{-3}$
DHRS4系統中 2系統以上が健全	$2.14 \times 10^{-8}$	$4.00 \times 10^{-6}$	$1.00 \times 10^{-3}$
	$2.12 \times 10^{-5}$	$3.98 \times 10^{-4}$	$9.95 \times 10^{-3}$
DHRS4系統中 3系統以上が健全	$1.84 \times 10^{-5}$	$2.00 \times 10^{-3}$	$1.00 \times 10^{-3}$
	$1.82 \times 10^{-3}$	$2.02 \times 10^{-2}$	$1.03 \times 10^{-2}$
DHRS4系統中 4系統が健全	$7.00 \times 10^{-3}$	$5.00 \times 10^{-3}$	$4.00 \times 10^{-3}$
	$6.97 \times 10^{-2}$	$4.98 \times 10^{-2}$	$3.98 \times 10^{-2}$

故障率  $\lambda_{DHRS} = 7.5 \times 10^{-6}$ 、 $\lambda_{D/G} = 1.0 \times 10^{-5}$ 

上段:100hr

下段:1000hr

表3-3 リスク減少価値(R.R.W.)とリスク増加価値(R.A.W.)

	完全独立[4/4]	2系統分離[2/4]	完全従属[1/4]
DHRS4系統中 1系統以上が健全			
DHRS4系統中 2系統以上が健全			
DHRS4系統中 3系統以上が健全			
DHRS4系統中 4系統が健全			

表3-4 リスク増加価値(R.A.W.)

	完全独立[4/4]	2系統分離[2/4]	完全従属[1/4]
DHRS4系統中 1系統以上が健全	523 523	920 2	915 1
DHRS4系統中 2系統以上が健全	393 393	572 230	915 1
DHRS4系統中 3系統以上が健全	262 262	457 2	911 3
DHRS4系統中 4系統が健全	132 132	184 184	230 230

上段:D/G

下段:DHRS

表3-5 リスク減少価値(R.R.W.)

	完全独立[4/4]	2系統分離[2/4]	完全従属[1/4]
DHRS4系統中 1系統以上が健全	2.33 1.75	$1.63 \times 10^3$ 1.00	$2.42 \times 10^9$ 1.00
DHRS4系統中 2系統以上が健全	1.75 1.47	2.66 1.23	$4.96 \times 10^5$ 1.00
DHRS4系統中 3系統以上が健全	1.40 1.27	2.00 1.00	$2.72 \times 10^2$ 1.00
DHRS4系統中 4系統が健全	1.17 1.12	1.25 1.18	1.33 1.23

上段:D/G

下段:DHRS

表3-6 非信頼度の比較(2) (D/G故障率一桁低減)

SETSコード算出値

	完全独立[4/4]	2系統分離[2/4]	完全従属[1/4]
DHRS4系統中 1系統以上が健全	$5.21 \times 10^{-13}$ (18.0)	$1.01 \times 10^{-8}$ (99.0)	$1.00 \times 10^{-4}$ (10.0)
	$5.14 \times 10^{-9}$ (17.9)	$1.10 \times 10^{-6}$ (90.9)	$9.95 \times 10^{-4}$ (10.0)
DHRS4系統中 2系統以上が健全	$2.45 \times 10^{-9}$ (8.7)	$3.11 \times 10^{-7}$ (12.8)	$1.00 \times 10^{-4}$ (10.0)
	$2.43 \times 10^{-6}$ (8.7)	$3.24 \times 10^{-5}$ (12.3)	$9.97 \times 10^{-4}$ (9.9)
DHRS4系統中 3系統以上が健全	$4.33 \times 10^{-6}$ (4.2)	$2.03 \times 10^{-4}$ (9.9)	$1.03 \times 10^{-4}$ (9.7)
	$4.30 \times 10^{-4}$ (4.2)	$2.33 \times 10^{-3}$ (8.7)	$1.33 \times 10^{-3}$ (7.7)
DHRS4系統中 4系統が健全	$3.40 \times 10^{-3}$ (2.1)	$3.20 \times 10^{-3}$ (1.6)	$3.10 \times 10^{-3}$ (1.3)
	$3.39 \times 10^{-2}$ (2.1)	$3.19 \times 10^{-2}$ (1.6)	$3.09 \times 10^{-2}$ (1.3)

上段:100hr

下段:1000hr

表3-7 非信頼度の比較(3) (DHRS故障率一桁低減)

SETSコード算出値

	完全独立[4/4]	2系統分離[2/4]	完全従属[1/4]
DHRS4系統中 1系統以上が健全	$1.33 \times 10^{-12}$ (7.0)	$9.99 \times 10^{-7}$ (1.0)	$1.00 \times 10^{-3}$ (1.0)
	$1.31 \times 10^{-8}$ (7.0)	$9.90 \times 10^{-5}$ (1.0)	$9.95 \times 10^{-3}$ (1.0)
DHRS4系統中 2系統以上が健全	$4.96 \times 10^{-9}$ (4.3)	$1.30 \times 10^{-6}$ (3.1)	$1.00 \times 10^{-3}$ (1.0)
	$4.90 \times 10^{-6}$ (4.3)	$1.29 \times 10^{-4}$ (3.1)	$9.95 \times 10^{-3}$ (1.0)
DHRS4系統中 3系統以上が健全	$6.93 \times 10^{-6}$ (2.7)	$2.00 \times 10^{-3}$ (1.0)	$1.00 \times 10^{-3}$ (1.0)
	$6.87 \times 10^{-4}$ (2.7)	$1.99 \times 10^{-2}$ (1.0)	$9.95 \times 10^{-3}$ (1.0)
DHRS4系統中 4系統が健全	$4.30 \times 10^{-3}$ (1.6)	$2.30 \times 10^{-3}$ (2.2)	$1.30 \times 10^{-3}$ (3.1)
	$4.28 \times 10^{-2}$ (1.6)	$2.29 \times 10^{-2}$ (2.2)	$1.29 \times 10^{-2}$ (3.1)

上段:100hr

下段:1000hr

表3-8 非信頼度の比較(4) (2系統分離[2/4])

SETSコード算出値

	通常ケース	D/G 1台付加	D/G 2台付加
DHRS4系統中 1系統以上が健全	$1.00 \times 10^{-6}$	$1.56 \times 10^{-9}$ (641)	$2.46 \times 10^{-12}$ (4.1E5)
	$1.00 \times 10^{-4}$	$1.55 \times 10^{-6}$ (64.5)	$2.39 \times 10^{-8}$ (4184)
DHRS4系統中 2系統以上が健全	$4.00 \times 10^{-6}$	$1.50 \times 10^{-6}$ (2.67)	$4.68 \times 10^{-9}$ (855)
	$3.98 \times 10^{-4}$	$1.53 \times 10^{-4}$ (2.60)	$4.63 \times 10^{-6}$ (86.0)
DHRS4系統中 3系統以上が健全	$2.00 \times 10^{-3}$	$1.00 \times 10^{-3}$ (2.0)	$5.37 \times 10^{-6}$ (372)
	$2.02 \times 10^{-2}$	$1.04 \times 10^{-2}$ (1.9)	$5.33 \times 10^{-4}$ (37.9)
DHRS4系統中 4系統が健全	$5.00 \times 10^{-3}$	$4.00 \times 10^{-3}$ (1.25)	$3.00 \times 10^{-3}$ (1.67)
	$4.98 \times 10^{-2}$	$3.99 \times 10^{-2}$ (1.25)	$3.01 \times 10^{-2}$ (1.65)

故障率  $\lambda_{D/G} = 7.5 \times 10^{-6}$ 、 $\lambda_{DHRS} = 1.0 \times 10^{-5}$ 

上段:100hr

下段:1000hr

表3-9 非信頼度の比較(5) (完全従属[1/4])

SETSコード算出値

	通常ケース	D/G 1台付加	D/G 2台付加
DHRS4系統中 1系統以上が健全	$1.00 \times 10^{-3}$	$9.99 \times 10^{-7}$ (1001)	$9.99 \times 10^{-10}$ (1.0E6)
	$9.95 \times 10^{-3}$	$9.90 \times 10^{-5}$ (101)	$9.88 \times 10^{-7}$ (1.0E4)
DHRS4系統中 2系統以上が健全	$1.00 \times 10^{-3}$	$1.00 \times 10^{-6}$ (1000)	$2.68 \times 10^{-9}$ (3.7E5)
	$9.95 \times 10^{-3}$	$1.01 \times 10^{-4}$ (98.5)	$2.65 \times 10^{-6}$ (3758)
DHRS4系統中 3系統以上が健全	$1.00 \times 10^{-3}$	$4.37 \times 10^{-6}$ (229)	$3.37 \times 10^{-6}$ (297)
	$1.03 \times 10^{-2}$	$4.34 \times 10^{-4}$ (23.7)	$3.36 \times 10^{-4}$ (30.6)
DHRS4系統中 4系統が健全	$4.00 \times 10^{-3}$	$3.00 \times 10^{-3}$ (1.33)	$3.00 \times 10^{-3}$ (1.33)
	$3.98 \times 10^{-2}$	$3.00 \times 10^{-2}$ (1.33)	$2.99 \times 10^{-2}$ (1.33)

故障率  $\lambda_{D/G} = 7.5 \times 10^{-6}$ 、 $\lambda_{DHRS} = 1.0 \times 10^{-5}$ 

上段:100hr

下段:1000hr

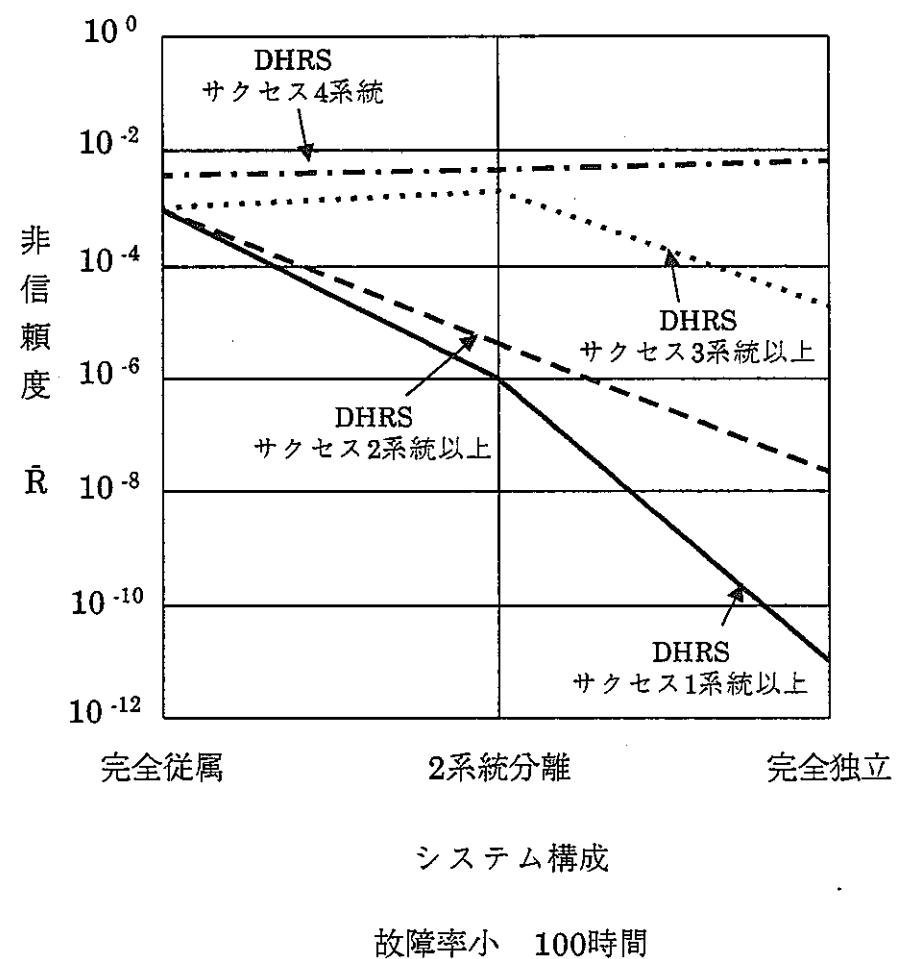
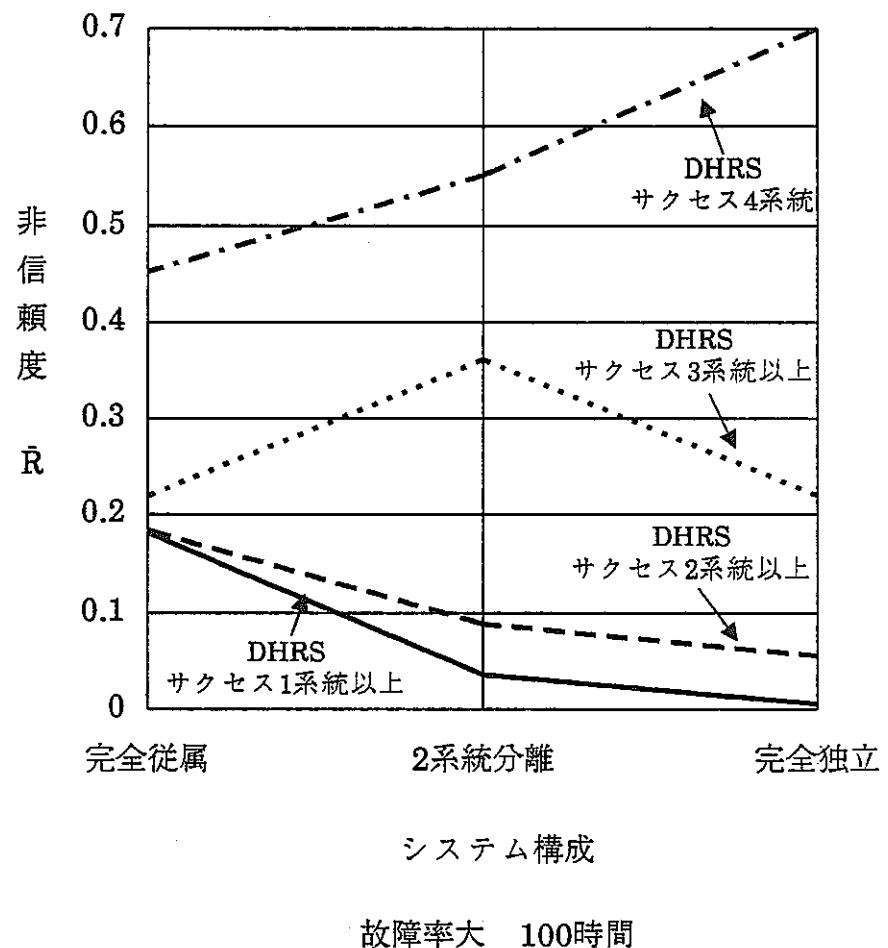


図3-1 各システムの非信頼度評価結果(1)

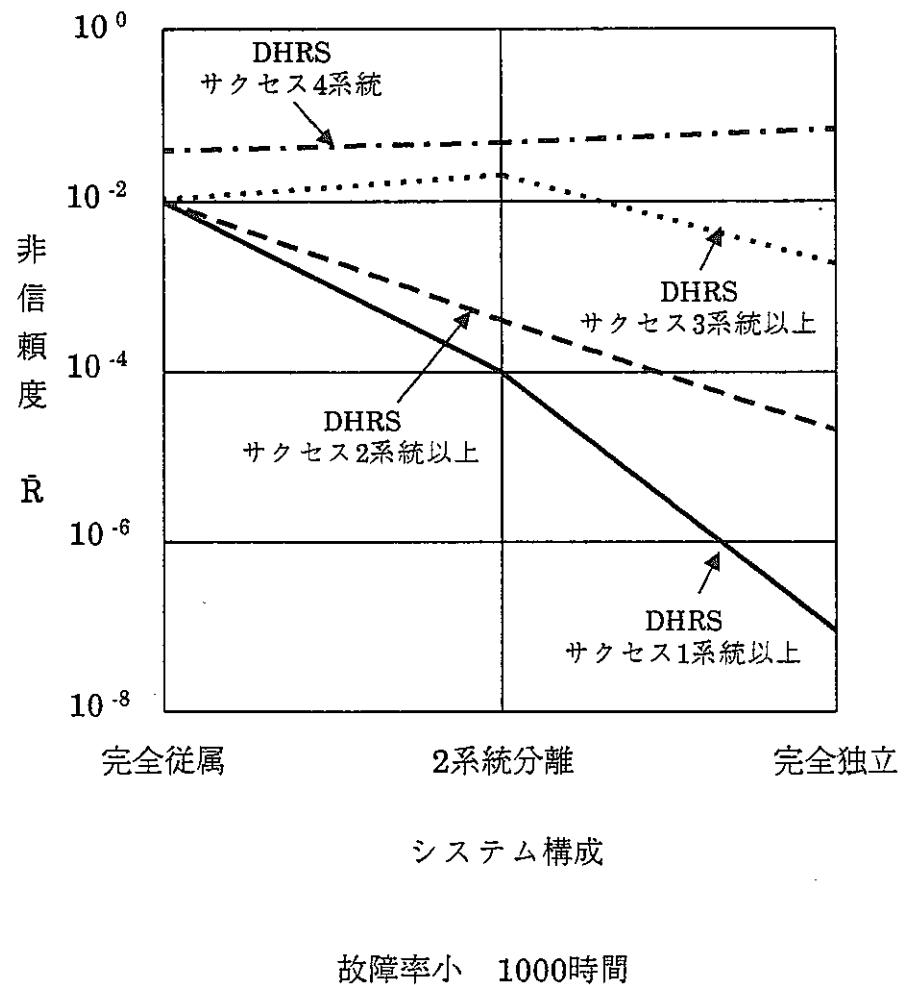
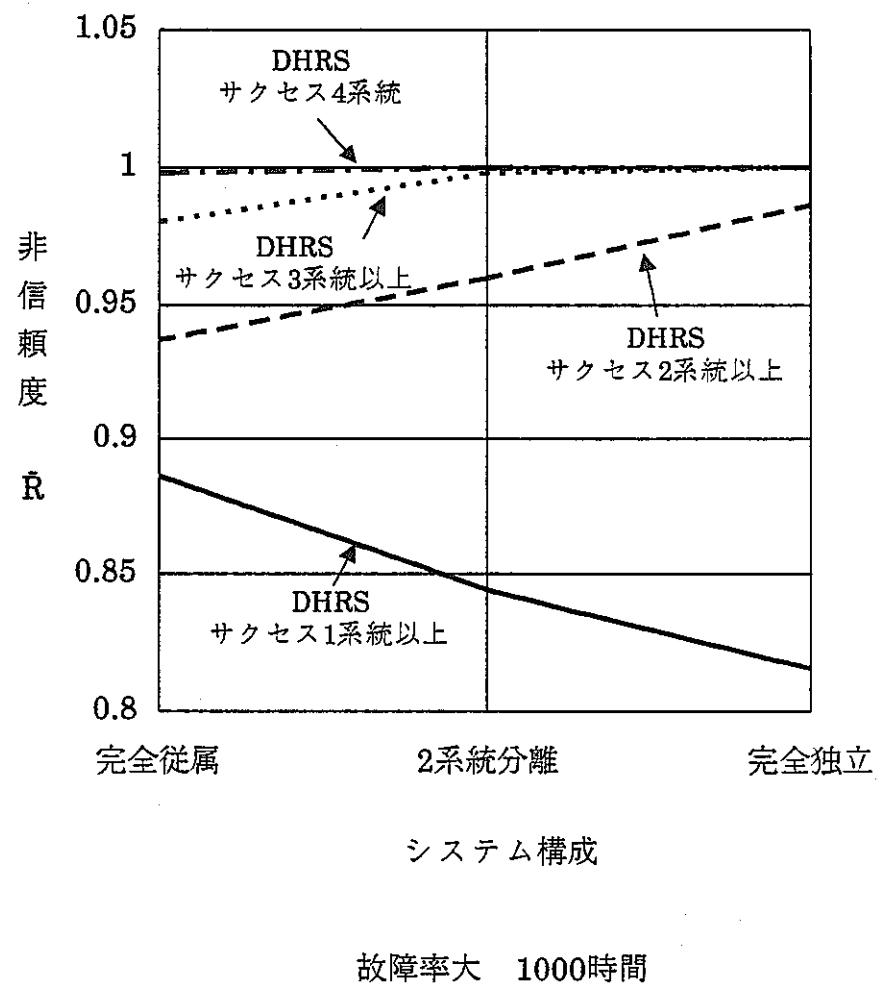


図3-1 各システムの非信頼度評価結果(2)

## 4. 要素技術設計研究でのIRACS信頼度評価

### 4.1 概 要

60年度要素技術設計研究(II)でのループ型プラント(熱出力2600MWt)では、崩壊熱除去方式として、強制循環IRACS(Intermediate Reactor Auxiliary Cooling System:2次系共用型補助炉心冷却系)を選定している。以下に、IRACSの概要を簡単に述べる。

60年度設計におけるIRACSの型式は、物量の削減及び2次系コールドレグ(C/L)のホットショック緩和を重要視し、2次系C/Lに設置したSG直列型となっている。

IRACSを含む2次系主要機器の配置図を図4-1に、またIRACSの主な仕様を表4-1に示す。IRACSは独立する4ループで構成され、各ループには各々1基の空気冷却器(A/C)、及び1基の送風機が設置されている。A/Cのナトリウム側入口配管は、SG出口より分岐し、ナトリウム側出口配管は、膨張タンクに接続されている。

定格出力運転時には、2次系C/Lに設けたIRACS切換弁を全開としておく。このIRACS待機時には、IRACS側に100t/hのナトリウムをバイパスして流す。なお空気側のベーン・ダンパは締め切っておく。

一方IRACSによる崩壊熱除去時には、原子炉はトリップし、1次系、2次系ともポンモータ(PM)運転に移行する。この際IRACS切換弁を全閉とするので、2次系PM流量の全てをIRACS側へ流す。これによりSGでは除熱は行わず、単なるナトリウム流路バスとしている。なお60年度設計では、非常用D/Gは2基/プラントとなっており、非常用D/G1基につき、2ループのIRACSが接続する2系統分離となっている。

このIRACSの除熱容量は、安全評価上最も厳しくなる1ループ強制循環除熱をサイジング条件と想定し、30MWt/ループに設定されている。

前報<sup>1)</sup>では、DRAC02コードを実機プラントに適用した一例として、このIRACSを対象としたテスト評価を行っている。

本章では、DRAC02コードの解析能力をさらにチェックするため、系統分離、自然循環除熱の有効性、及び除熱容量等をパラメータに、追加サーベイを行った。

## 4.2 解析条件

### (1)ベース・ケースの概要

図4-2は、要素技術設計研究(II)におけるIRACS(強制循環時の除熱容量30MWt×4系統)]を、モデル化したものである。

表4-2に、このIRACSで選定した7つのコンポーネントを示す。冷却系配管をモデル化した静的機器PSP1、SSP1の故障は、グルーピングルール(配管破損による除熱能力喪失)として取扱う。また非常用D/G(2台)を表すEDC1は、動的機器である冷却系ポンプPDC1、SDC1に給電するものとしている。

表4-3に、サブシステムを示す。サブシステムとしては、崩壊熱除去系(DHRS)と非常用D/Gの2種類を選定している。なお非常用D/Gは、従属サブシステム(即ち、非常用D/Gの故障で、動的機器である冷却系ポンプPDC1、SDC1が故障する)として取扱う。

表4-4に、DHRSの機能分類を示す。非常用D/G以外の6つのコンポーネントの全てが健全であれば、強制循環(Forced Circulation, 以下F/Cと略す)除熱が可能、静的機器1、3、5、6が健全であれば、自然循環(Natural Circulation, 以下N/Cと略す)除熱が可能、それ以外の場合には、除熱不能としている。

表4-5に、原子炉の健全性を維持できる条件であるサクセス・クライテリア(必要ループ数)を示す。「もんじゅ」でのIRACS信頼性評価<sup>4)</sup>にしたがって、使命時間(DHRSによる除熱が必要な時間)を、保守的に計画炉停止時における720hr(=1ヶ月:燃料交換時を想定)に設定し、その720hrを4つの時間区分に分け、各時間区分ごとにサクセス・クライテリアを暫定的に設定した。

表4-6に、各コンポーネントの故障率データ(起動失敗確率、故障率、修復率)を示す。この故障率データは、WASH-1400<sup>5)</sup>等をベースに、一部最近の軽水炉での故障率データ<sup>6)</sup>も参考に設定した。なお1次系及び2次系機器の修復は、保守的に考慮していない。

本解析の起因事象としては、「外部電源喪失」を想定している。また使命時間中の外部電源の回復は考慮していない。したがって、時刻0で1次系、2次系ポンニーモータへの切り替え、空気冷却器の立上げ、空気冷却器切換弁の閉操作、ディーゼル発電機の起動操作が行われるものとしている。

### (2)追加解析の解析ケース

表4-7に、追加解析の解析ケースを示す。まず(1)の条件に対し、非常用D/Gを1ループごとに接続させ、DHRSと非常用D/Gを完全独立とした場合(CASE4-1)を比較した。

この条件に対して、N/C除熱を考慮しない場合(CASE4-2, 4-3)、N/C除熱ループ数を各時間区分で1ループ減少させた場合(CASE4-4)、及びLEDHERコード<sup>7)</sup>による除熱特性評価結果<sup>8)</sup>を反映させて、完全独立のシステムの除熱容量を半減し、サクセス・クライテリアを見直した場合(CASE4-5)について評価した。

### 4.3 信頼度評価結果

#### (1) 系統分離の影響(CASE4-1)

図4-3に、CASE4-1のdemandあたりの非信頼度 $\bar{R}(t)$ [時刻tまでに機能を喪失する確率]、非稼働度 $\bar{A}(t)$ [時刻tで機能を喪失している確率(修復を考慮)]の時間変化を示す。図中の○が、ベースケースである2系統分離[2/4]のシステム、△が完全独立[4/4]のシステムの結果を表している。

両者とも、時間経過とともに非信頼度、非稼働度が増加していく。しかし、時間区分が変わる時刻でサクセス・クライテリアが緩和されるため、非信頼度はその増加傾向が一旦飽和するようになる。また非稼働度は、時間区分が変わる時刻で不連続的に低下することがわかる。

非常用D/G作動によるF/C除熱が支配的となる時間区分3あたりまでは、非常用D/Gの冗長性を高めた完全独立のシステムのほうが非信頼度、非稼働度ともに低くなっている。しかし、N/C除熱が支配的となる時間区分4以降になると、非信頼度、非稼働度ともほぼ等しくなる。720時間(使命時間)の時点における非信頼度は、 $3.987 \times 10^{-7}$ /demand(2系統分離)、 $3.928 \times 10^{-7}$ /demand(完全独立)、また非稼働度は、 $5.772 \times 10^{-7}$ /demand(2系統分離)、 $5.773 \times 10^{-7}$ /demand(完全独立)となった。

したがってCASE4-1の条件(除熱容量、サクセス・クライテリアとも同一)では、720時間の使命時間を経過した後は、非常用D/GとDHRSの系統分離の影響が表れない結果となった。

#### (2) 自然循環除熱の有効性(CASE4-2, 4-3, 4-4)

CASE4-1の結果から、N/C除熱のクレジットを考慮すると、非常用D/GとDHRSの系統分離の影響が表れないことがわかり、サクセス・クライテリアからN/C除熱の条件を削除した場合の、両システムの信頼度を比較した。

図4-4に、時間区分をCASE4-1と同様に4つの領域にわけ「F/C1ループ以上」のみとしたサクセス・クライテリアで評価したCASE4-2の非信頼度 $\bar{R}$ 、非稼働度 $\bar{A}$ の時間変化を示す。

CASE4-2では、非常用D/Gの故障がDHRSの信頼度に直接影響するようになるため、使命時間にわたって、完全独立のシステムのほうが非信頼度、非稼働度とも約1オーダ程度低くなっている。720時間の時点における非信頼度は、 $5.923 \times 10^{-5}$ /demand(2系統分離)、 $3.879 \times 10^{-6}$ /demand(完全独立)、また非稼働度は、 $3.666 \times 10^{-5}$ /demand(2系統分離)、 $5.713 \times 10^{-6}$ /demand(完全独立)となった。

図4-5は、CASE4-1とCASE4-2の結果を比較して示したものである。図中の黒で示したものが、CASE4-2の結果を表している。これより2系統分離のシステムでは、N/C除熱の活用により、F/C除熱のみの場合に比べ約2オーダ程度信頼度を向上できることがわかった。

CASE4-2では、時間区分を4つの領域にわけているが、各時間区分におけるサクセス・クライテリアは、「F/C1ループ以上」一定とした条件で解析している。しかし、図4-3に示すように非信頼度が、時間区分が変わる時刻で、CASE4-1と同様に増加傾向が一旦飽和している。

そこでCASE4-3では、0.5~720時間を1つの時間区分に設定して、CASE4-2と同様F/C1ループのみとしたサクセス・クライテリアで評価した。

図4-6は、CASE4-2とCASE4-3の結果を比較して示したものである。図中の黒で示したものが、CASE4-3の結果を表している。CASE4-2とCASE4-3の解析条件の相違点は、時間区分を細分化する/しないというだけで、本来は両CASEの非信頼度、非稼働度とも一致するはずである。

図4-6よりわかるように、非稼働度は、CASE4-2、CASE4-3で一致しているが、非信頼度には、CASE4-2とCASE4-3で時間区分が変わる時刻以降で相違が見られる。

710時間の時点における非信頼度は、2系統分離のシステムでは、 $5.703 \times 10^{-5}/\text{demand}$  (CASE4-2)、 $8.078 \times 10^{-5}/\text{demand}$  (CASE4-3)となる。また完全独立のシステムでは、 $3.879 \times 10^{-6}/\text{demand}$  (CASE4-2)、 $6.582 \times 10^{-6}/\text{demand}$  (CASE4-3)となり、CASE4-2の結果は、CASE4-3における約620時間あたりの非信頼度に相当しており、非信頼度を非安全側に評価している。

DRAC02コードは、時間区分が変わる時点で、起動失敗確率、故障率、修復率の時間変化を考慮するようにしている。本解析では、故障率、修復率は一定とし、起動失敗確率はdemandが発生した時刻0においてのみ取扱っている。このため、1つ前の時間区分の最後の時間ステップでの非信頼度が、次の時間区分の起動失敗確率(全て0を代入)によって、見掛け上修復されたようになり、このような時間に対する飽和傾向を示すようになったものと考えられる。

したがって現状のDRAC02コードでは、時間区分設定により、非信頼度を過小評価(非安全側)することがわかり、非信頼度の計算方法を改良する必要があることがわかった。(なお、比較するシステムの時間区分が等しい場合は、相対的な信頼度評価は可能であり、また使命時間を安全側に100時間程度長くとれば、この影響は小さくなるものと考える。)

次に図4-7は、N/C除熱ループ数を、CASE4-1に対し各時間区分で1ループずつ減少させたCASE4-4の結果を示したものである。720時間の時点での両システムの非信頼度は、 $4.181 \times 10^{-8}/\text{demand}$  (2系統分離)、 $4.174 \times 10^{-8}/\text{demand}$  (完全独立)と大きな差はない。また非稼働度は、時間区分3以降(N/C除熱ループ数が2以下)では、系統分離の影響が表れず、720時間では $6.120 \times 10^{-8}/\text{demand}$ で一致している。

図4-8は、CASE4-1とCASE4-4の結果を比較したものである。サクセス・クライテリアが、各時間区分でN/C1ループずつ緩和されているので、非信頼度、非稼働度は、いずれもCASE4-4のほうが小さくなっている。サクセス・クライテリアの緩和による非信頼度低減の影響は、2系統分離のほうがより顕著に表れている。またCASE4-4の非稼働度は、サクセス・クライテリアが等しい次の時間区分のCASE4-1の非稼働度とあたかも連続して増加する傾向にあるのがわかる。

このように、サクセス・クライテリアが各時間区分でN/C1ループずつ緩和される場合には、非信頼度、非稼働度とも1オーダ程度低減できる。

## (3)除熱容量の影響(CASE4-5)

62年度に実施したLEDHERコードを用いた、IRACSの強制循環除熱特性解析結果<sup>8)</sup>より、非常用D/Gを4台設置し、完全独立のシステムとすれば、30MWtの除熱容量を半減できる見通しが得られている。また安全工学部原子炉工学室で61年度に実施した自然循環除熱解析結果<sup>9)</sup>より、30MWtの除熱容量では、2ループ自然循環除熱で崩壊熱が除去できるという知見が得られている。

これらの除熱特性解析の結果を用い、CASE4-5では、完全独立のシステムにおける強制循環時の除熱容量を15MWtに設定して、系統分離の影響を評価した。なおいずれのシステムとも、自然循環時の除熱容量を、強制循環時の1/2と仮定した。

したがってサクセス・クライテリアは、2系統分離のシステムでは、時間区分2「F/C1ループ OR N/C2ループ 以上」、それ以降を「F/C1ループ OR N/C1ループ 以上」となる。

また完全独立のシステムでは、時間区分2「F/C2ループ OR N/C4ループ 以上」、時間区分3「F/C1ループ OR N/C2ループ 以上」、時間区分4「F/C1ループ OR N/C1ループ 以上」となる。

図4-9に、CASE4-5の結果を示す。サクセス・クライテリアは、完全独立のシステムのほうが2系統分離のシステムより厳しい。このため600時間あたりまで、2系統分離のシステムのほうが非信頼度が大幅に低くなっている。なお720時間の時点における非信頼度は、 $6.738 \times 10^{-8}/\text{demand}$ (2系統分離)、 $5.263 \times 10^{-8}/\text{demand}$ (完全独立)と、完全独立のほうが低いが、大きな相違ではない。

要素技術設計研究(II)では、demandあたりの非信頼度を $10^{-7} \sim 10^{-8}$ とする方針<sup>10)</sup>が示されており、本解析での非信頼度は、この信頼度目標の範囲内にあることがわかった。

また非稼働度も、時間区分3までは2系統分離のほうが低いが、時間区分4以降はほぼ一致しており、720時間における非稼働度は、 $6.120 \times 10^{-8}/\text{demand}$ となる。このように、完全独立のシステムの除熱容量を半減すると、わずかに完全独立のシステムのほうが信頼度が向上することがわかった。

なお完全独立のシステムでは、時間区分2で次のサクセス・クライテリアを考えらえる。

- ①F/C除熱 2ループ(15MWt×2)以上 OR
- ②N/C除熱 4ループ(7.5MWt×4)以上 OR
- ③F/C除熱 1ループ(15MWt) AND
- ④N/C除熱 2ループ(7.5MWt×2)以上

すなわち、① OR ② OR [ ③ AND ④ ]となり、表6にしめす条件と[ ③ AND ④ ]の条件とのORが考えられる。

現状のDRAC02では、DHRSとHVACSのような2種類のサブシステム間のサクセス・クライテリアのAND条件は取り扱える。しかし、DHRS1種類のサブシステムについては、[ ① OR ② OR ③ ] AND ④のように、AND以前のすべての条件と、以降の条件とのANDをとるため、上記のようなかっこつきAND条件の取扱いができないことがわかった。したがってサクセス・クライテリアを[ ① OR ② ]として評価した完全独立のシステムの信頼度は、保守側の結果を示していることになる。

さらに、熱交換器の故障率データを、除熱容量あたりのデータとして扱うこともあるが、今回の解析では、設備の容量がかわっても、コンポーネントの故障率データは一定としている。

したがって、これらの条件も考慮すると、完全独立のシステムと2系統分離のシステムとの差がより顕著になるかもしれないが、コードの改良も含め今後の検討課題とする。

#### (4)外部電源喪失の頻度

CASE4-5の結果より、外部電源喪失時のIRACSの非信頼度は、 $6.738 \times 10^{-8}/\text{demand}$ (2系統分離)、 $5.263 \times 10^{-8}/\text{demand}$ (完全独立)となった。このDHRS機能喪失確率に、外部電源喪失の頻度をかけることによって、(1/炉・年)の単位での非信頼度が求まる。

「もんじゅ」での信頼性評価では、外部電源故障率 $2.3 \times 10^{-5}/\text{hr}$ (WASH-1400)から、  
 $\text{頻度 } D = 2.3 \times 10^{-5}/\text{hr} \times 24\text{hr/day} \times 365\text{day/year} = 0.2/\text{炉}\cdot\text{年}$   
 としている。

本解析でも、この発生頻度を用いるとすれば、

$$\begin{aligned}\text{非信頼度}(1/\text{炉}\cdot\text{年}) &= 0.2/\text{炉}\cdot\text{年} \times 6.738 \times 10^{-8}/\text{demand} = 1.348 \times 10^{-8} \text{ (2系統分離)} \\ &= 0.2/\text{炉}\cdot\text{年} \times 5.263 \times 10^{-8}/\text{demand} = 1.052 \times 10^{-8} \text{ (完全独立)}\end{aligned}$$

として評価できる。

なおIRACSの総合非信頼度を求めるには、外部電源喪失以外の事象として、計画停止、自然循環阻害事象、及び全過渡回数の頻度を求め、各事象ごとのdemandあたりの非信頼度をかけ、その総和をとる必要がある。

#### 4.4 結論

60年度要素技術設計研究(II)の崩壊熱除去系に選定したIRACSを対象に、系統分離、自然循環除熱の有効性、及び除熱容量等をパラメータとして信頼度を評価し、以下の結果が得られた。

- ①自然循環除熱のクレジットを考慮すると、2系統分離の場合、1回の作動要求あたりの信頼度は、約2オーダ程度向上する。
- ②同一のサクセス・クライテリアで比較した場合、非常用D/GとDHRSの系統構成を2系統分離から、完全独立としても、自然循環除熱が可能であれば、使命時間720hrでの信頼度は、ほぼ等しくなる。
- ③完全独立の場合の除熱容量を、2系統分離の除熱容量の1/2とした場合には、完全独立のほうがわずかに信頼度が向上する。
- ④外部電源喪失時のdemandあたりの非信頼度は、信頼度目標 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ /demandの範囲にある。

なお信頼度をさらに精度良く評価するには、今後以下の計算モデルを改良する必要があることがわかった。

- a)時間区分が変わる時点での非信頼度計算モデル
- b)サクセス・クライテリアの[かっこつきAND]条件の取扱い

表4-1 IRACSの仕様

項 目	単 位	仕 様	備 考
基 数 形 式	基 / ループ -	1 フィンチューブ強制空冷式	4ループ
機 器 種 別	-	管側 : 第3種管 胴側 : 適用外	
耐 震 ク ラ ス	-	As	
配 管 口 径	-	18B	
管側最高使用圧力、温度			
内 圧 条 件	kgf/cm <sup>2</sup> / °C	6 / 330	
外 圧 条 件	kgf/cm <sup>2</sup> / °C	1 / 100	
胴側最高使用圧力、温度			
内 圧 条 件	kgf/cm <sup>2</sup> / °C	0.06 / 330	
サイジング条件			
交 換 热 量	MWt	30	
管側温度(入口/出口)	°C	470 / 364	
胴側温度(入口/出口)	°C	40 / 200	
流量(管側/胴側)	t/h	800 / 666	
压 力 損 失			
管 側	kgf/cm <sup>2</sup>	0.044 [ 0.05 ]	[ ]内に許容圧力
胴 側	kgf/cm <sup>2</sup>	0.019 [ 0.02 ]	損失を示す
伝熱管材質	-	SUS316TB	
寸 法	mm	60.3Φ×2.9t	
本 数	本	134	
有効伝熱面積	m <sup>2</sup>	2400	
IHX~A/C伝熱中心差	m	22.225	
ス タ ッ ク 高 さ	m	19.55	
概 略 形 状	mm	6600L×6900W×5500H	
概 略 重 量	ton	98	ナトリウム及び 保温材重量含まず

表4-2 IRACSコンポーネントの選定

iCMP	コンポーネント名	略号	備考
1	1次系静的機器	PSP1	配管,逆止弁,IHXからの漏洩 ポンプ軸固定を含む
2	1次系ポンプ	PDC1	流路バスを阻害しない故障
3	2次系静的機器	SSP1	配管,弁,ポンプ,IHX,SG,ACS からの漏洩,ポンプ軸固定を含む
4	2次系ポンプ	SDC1	流路バスを阻害しない故障
5	空気冷却器	ADC1	出入口ダンパ、入口ベーン
6	空気冷却器切換弁	ADC2	閉失敗、誤閉を考慮
7	ディーゼル発電機	EDC1	2ループに1基のD/Gが設置

表4-3 IRACSサブシステムの選定

iSS	サブシステム名	略号	構成するコンポーネント
1	崩壊熱除去系	DHRS	iCMP=1,2,3,4,5,6
2	非常用ディーゼル	D/G	iCMP=7

表4-4 IRACSサブシステムの機能分類

分類番号 iSSS	保持している機能	コンポーネント状態
1	IRACSによる強制循環可能	iCMP=1~6 すべて健全
2	IRACSによる自然循環可能	iCMP=1,3,5,6 が健全
3	除熱不能	上記以外

表4-5 IRACSサクセス・クライテリアの選定

時間区分	時 間	サクセス・クライテリア
1	0 ~ 0.5 hr (許容停止時間)	
2	0.5 ~ 20 hr	強制循環1ループ以上 or 自然循環4ループ以上
3	20 ~ 100 hr	強制循環1ループ以上 or 自然循環3ループ以上
4	100 ~ 720 hr (使命時間)	強制循環1ループ以上 or 自然循環2ループ以上

表4-6 IRACSコンポーネントの起動失敗確率、故障率、修復率

iCMP	起動失敗確率Q* (1/demand)	故障率λ* (1/hr)	修復率μ* (1/hr)
1	0.0	$1.5 \times 10^{-6}$	0.0
2	$3.0 \times 10^{-4}$	$2.0 \times 10^{-5}$	0.0
3	0.0	$2.05 \times 10^{-5}$	0.0
4	$3.0 \times 10^{-4}$	$2.0 \times 10^{-5}$	0.0
5	$9.0 \times 10^{-4}$	$9.0 \times 10^{-7}$	0.2
6	$3.0 \times 10^{-4}$	$3.0 \times 10^{-7}$	0.2
7	$1.2 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-5}$	0.05

\*データは、WASH-1400等による。

表4-7 IRACS信頼性評価解析ケース

解析 ケース	システム構成		サクセス・クライティリア		
	系統構成	除熱容量/基	時間区分2	時間区分3	時間区分4
CASE4-1	2系統分離	F/C 30MWt	F/C1 or N/C4	F/C1 or N/C3	F/C1 or N/C2
	完全独立	同上	同上	同上	同上
CASE4-2	2系統分離	F/C 30MWt	F/C1	F/C1	F/C1
	完全独立	同上	同上	同上	同上
CASE4-3	2系統分離	F/C 30MWt		F/C1	
	完全独立	同上		同上	
CASE4-4	2系統分離	F/C 30MWt	F/C1 or N/C3	F/C1 or N/C2	F/C1 or N/C1
	完全独立	同上	同上	同上	同上
CASE4-5	2系統分離	F/C 30MWt	F/C1 or N/C2	F/C1 or N/C1	
	完全独立	F/C 15MWt	F/C2 or N/C4	F/C1 or N/C2	F/C1 or N/C1

F/C:強制循環除熱モード N/C:自然循環除熱モード

数値は、ループ数を表わし、そのループ数以上のループが除熱機能を満足すれば、  
プラントの健全性が確保されるとする。

なおCASE4-5の完全独立では、時間区分2において、表の条件に加え、  
F/C1 AND N/C2というケースが考えられるが、現状の解析モデルでは、取り扱えない。

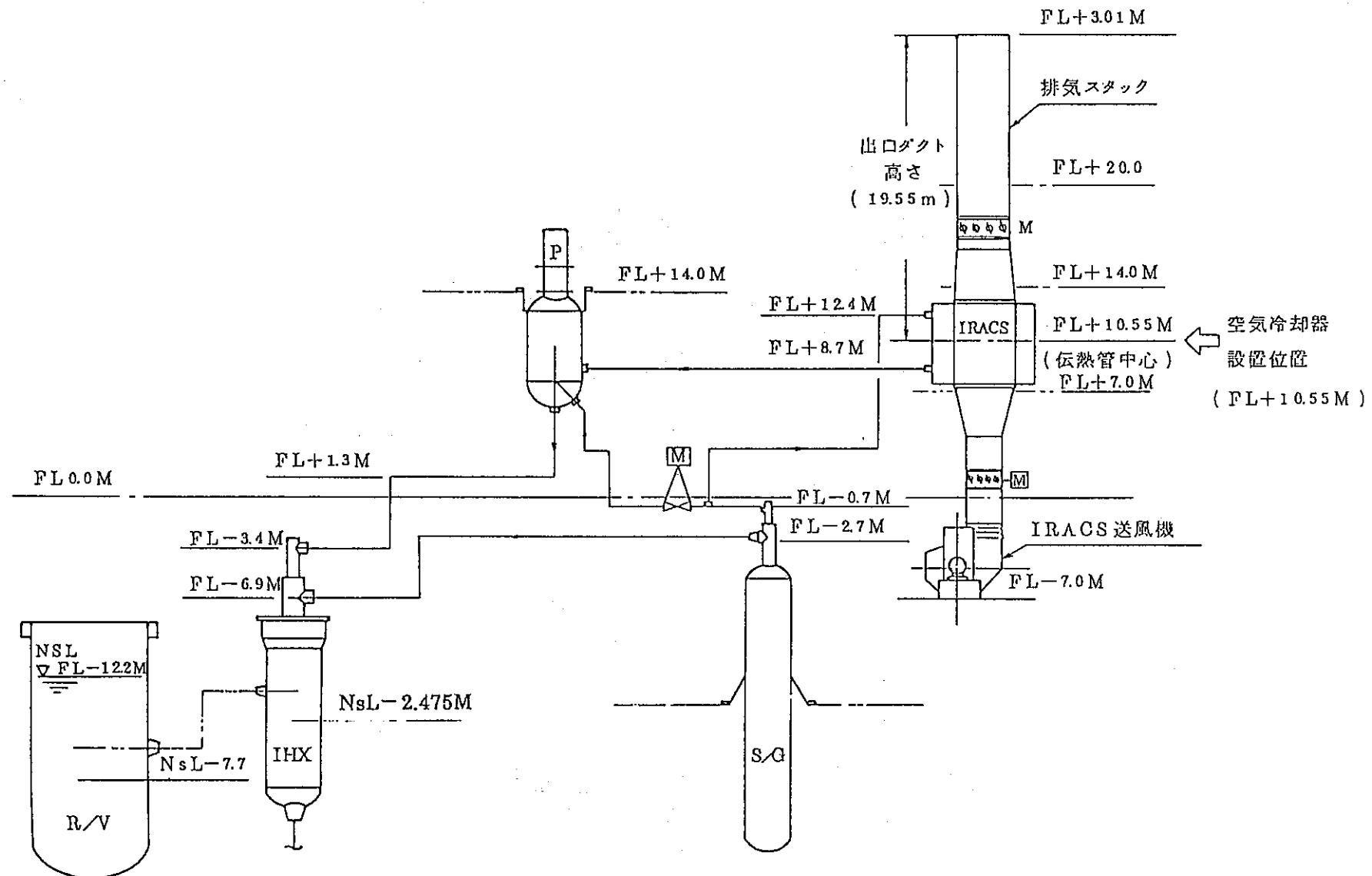


図4-1 要素技術設計研究(II)の2次系配置図

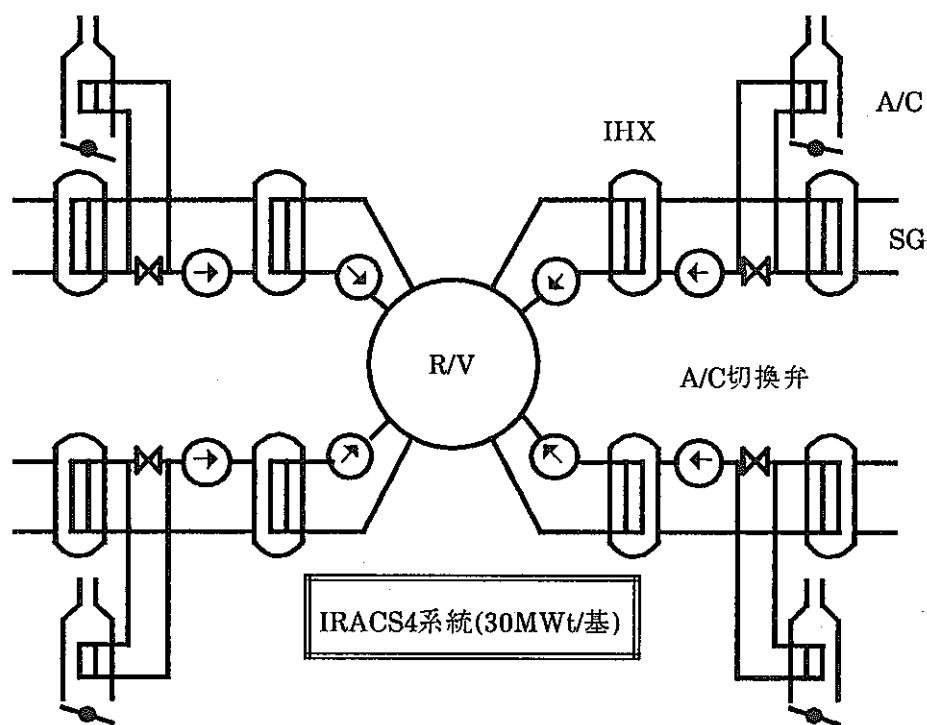


図4-2 要素技術設計研究(II)のIRACSモデル

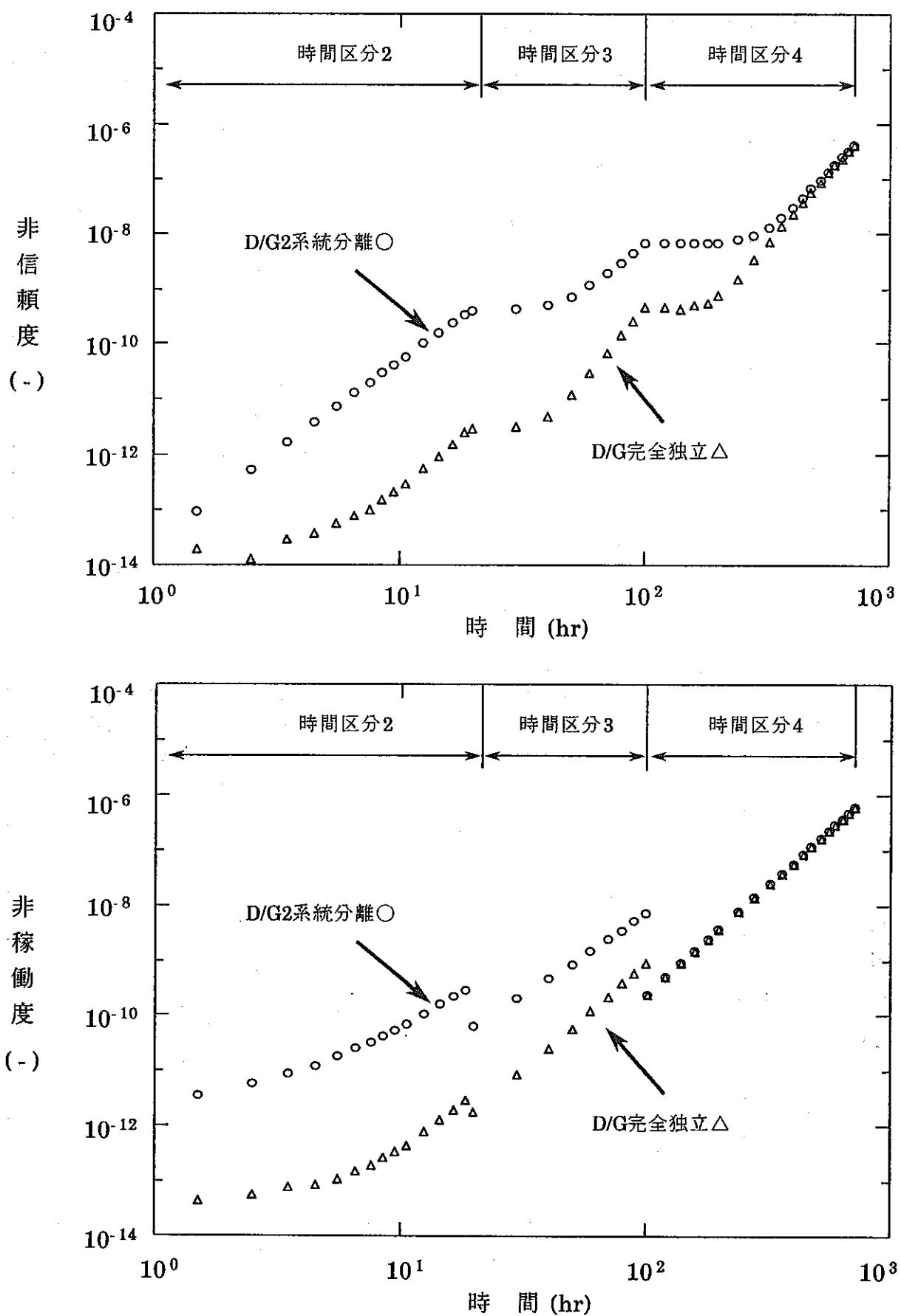


図4-3 IRACS信頼性評価結果 [CASE4-1]

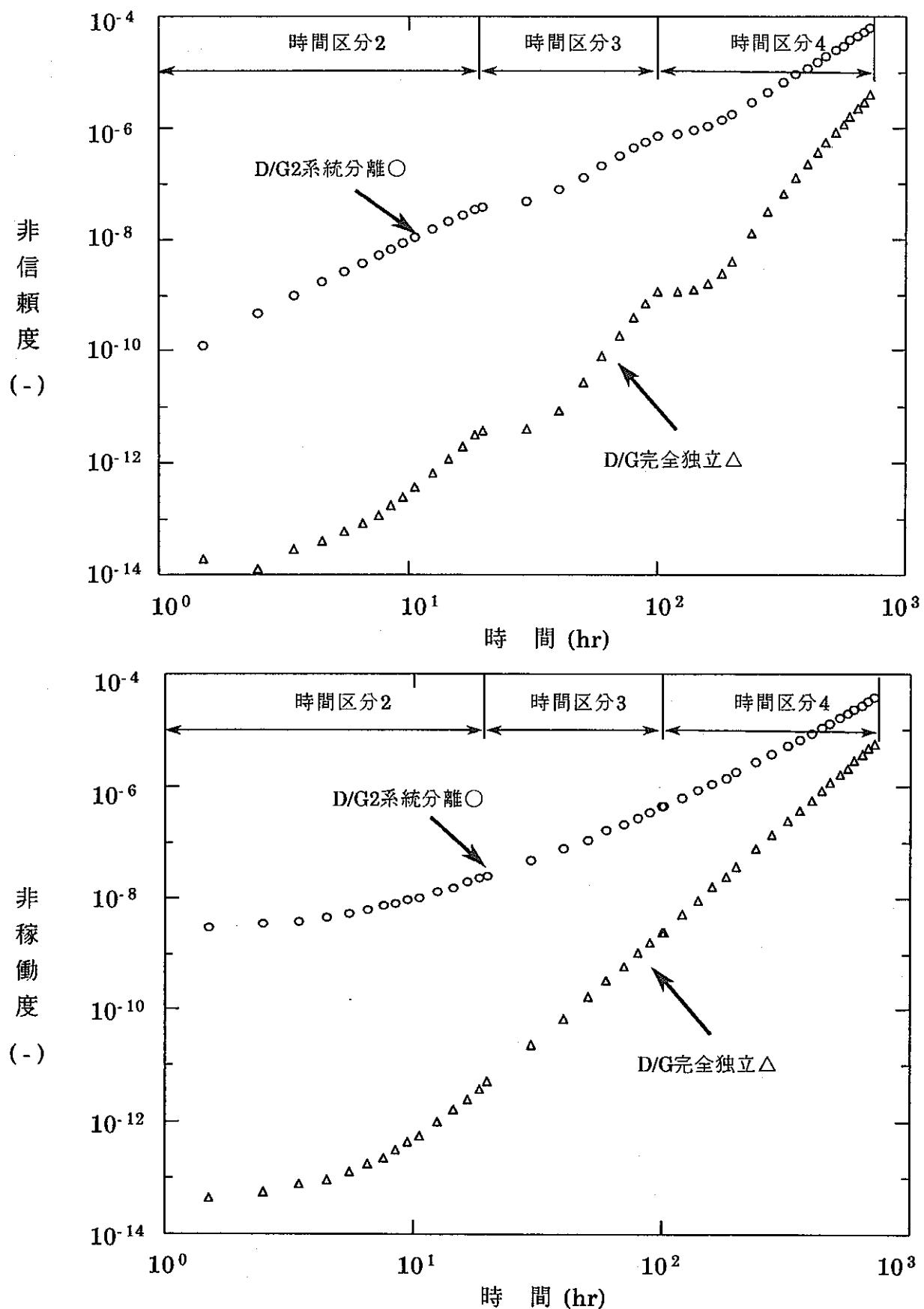


図4-4 IRACS信頼性評価結果 [CASE4-2]

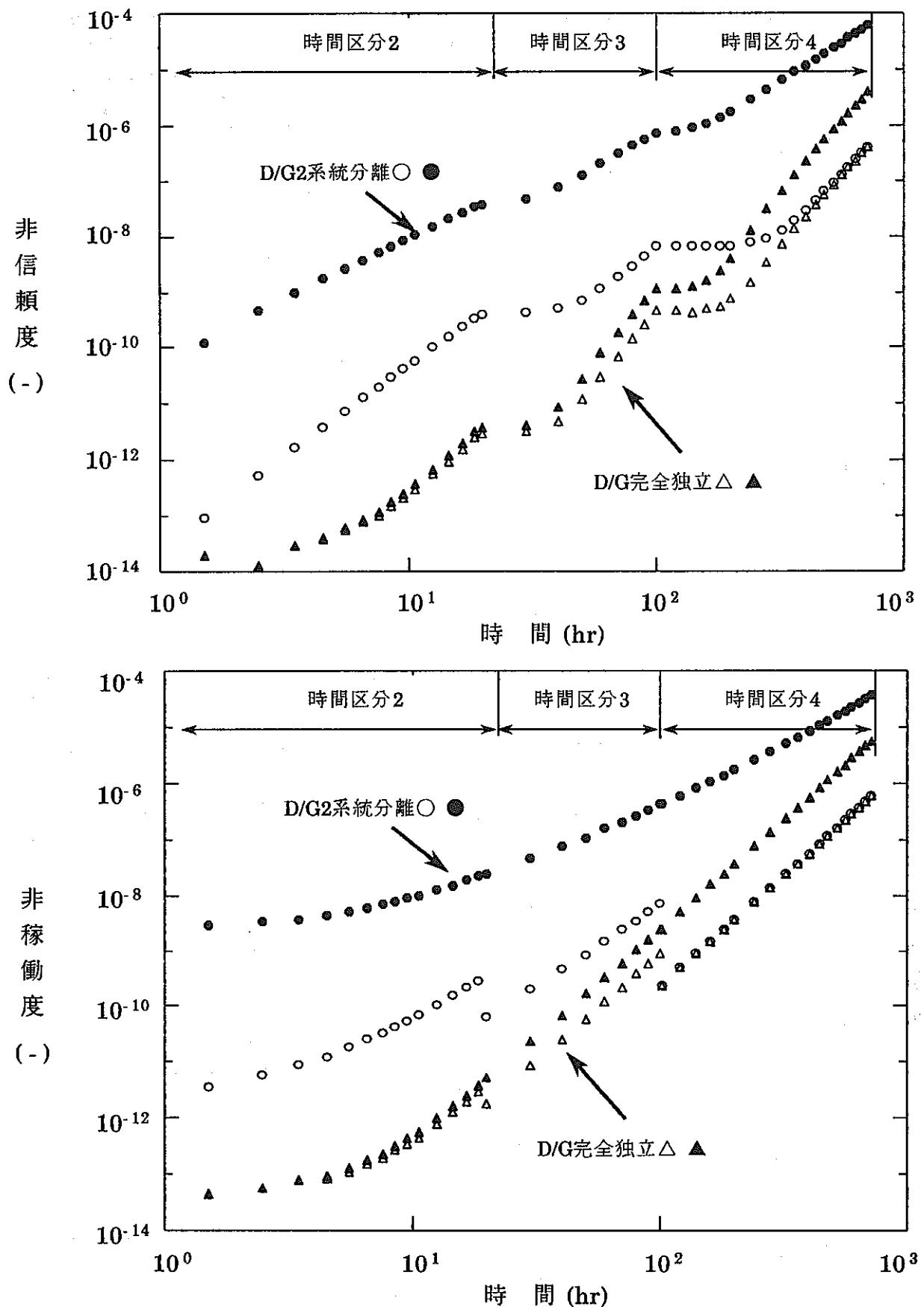


図4-5 IRACS信頼性評価結果 [CASE4-1とCASE4-2の比較]

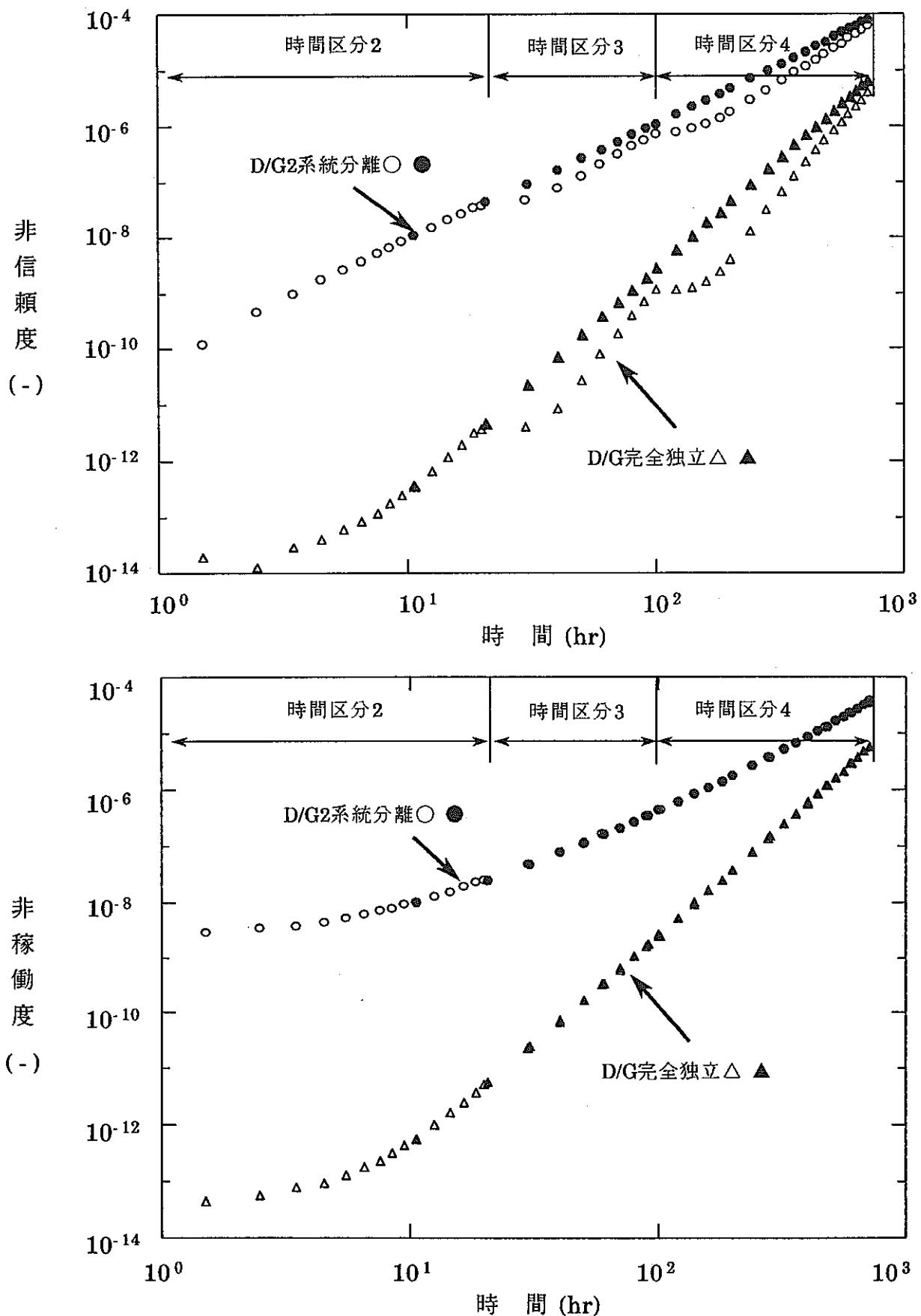


図4-6 IRACS信頼性評価結果 [CASE4-2とCASE4-3の比較]

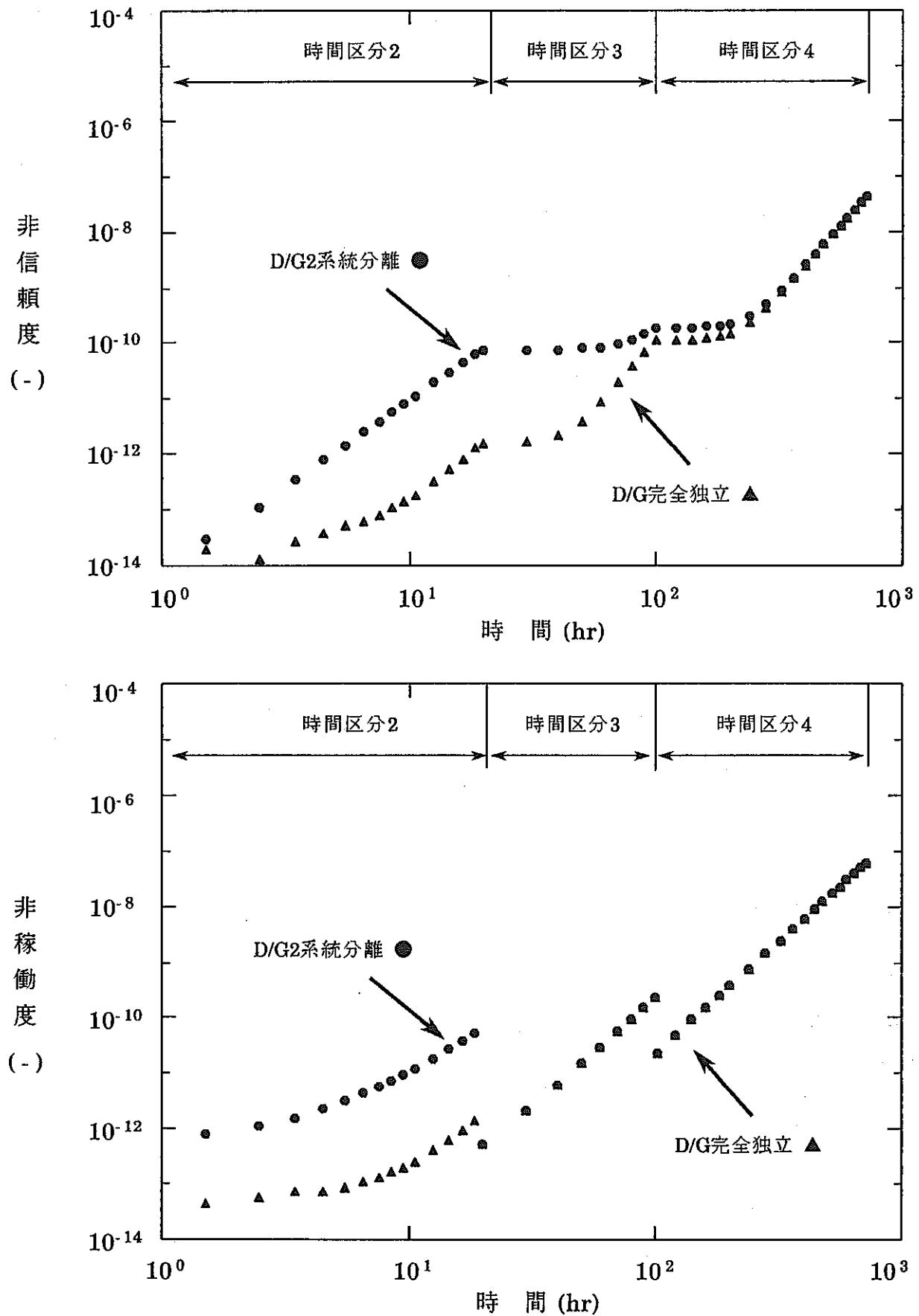


図4-7 IRACS信頼性評価結果 [CASE4-4]

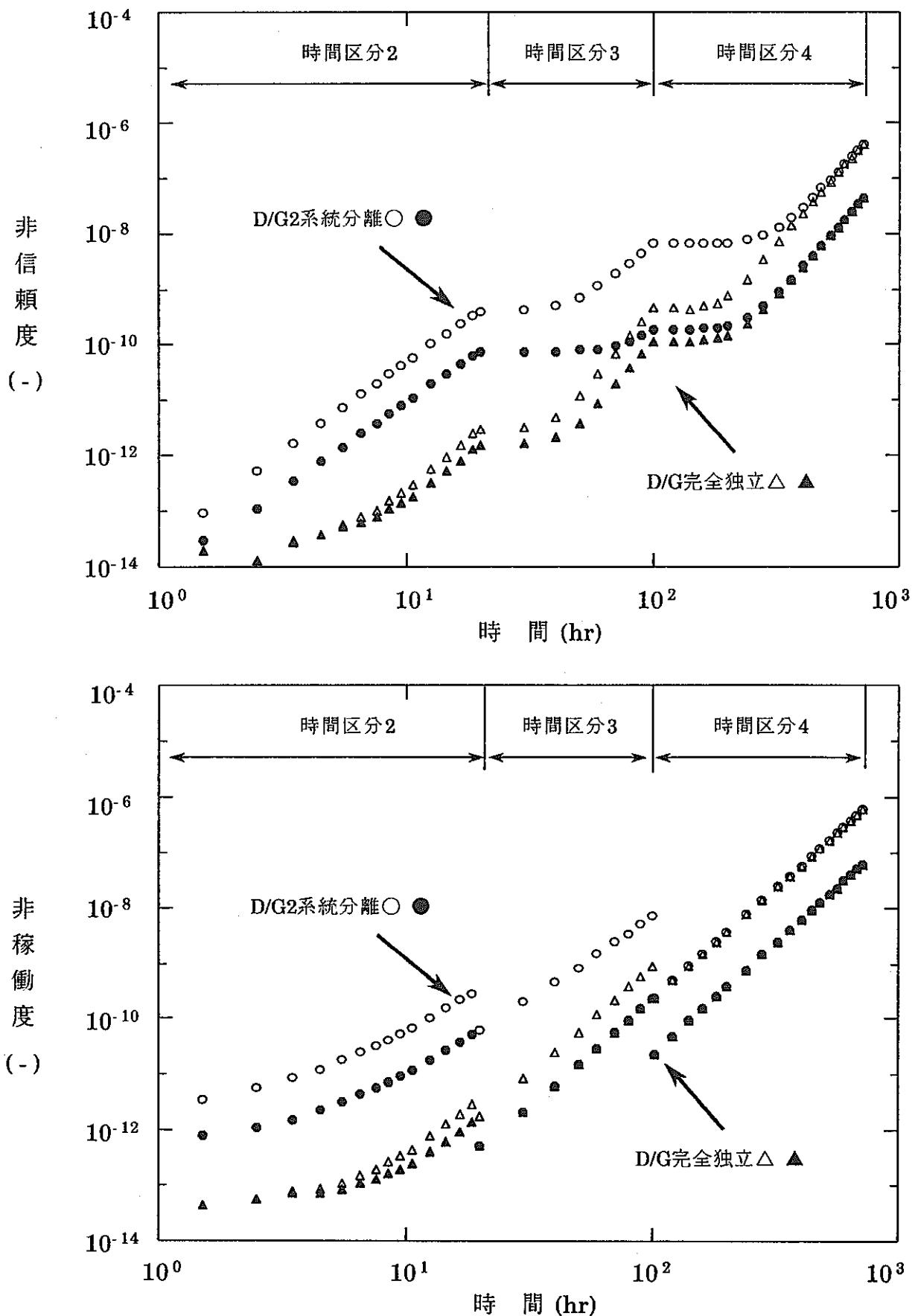


図4-8 IRACS信頼性評価結果 [CASE4-1とCASE4-4の比較]

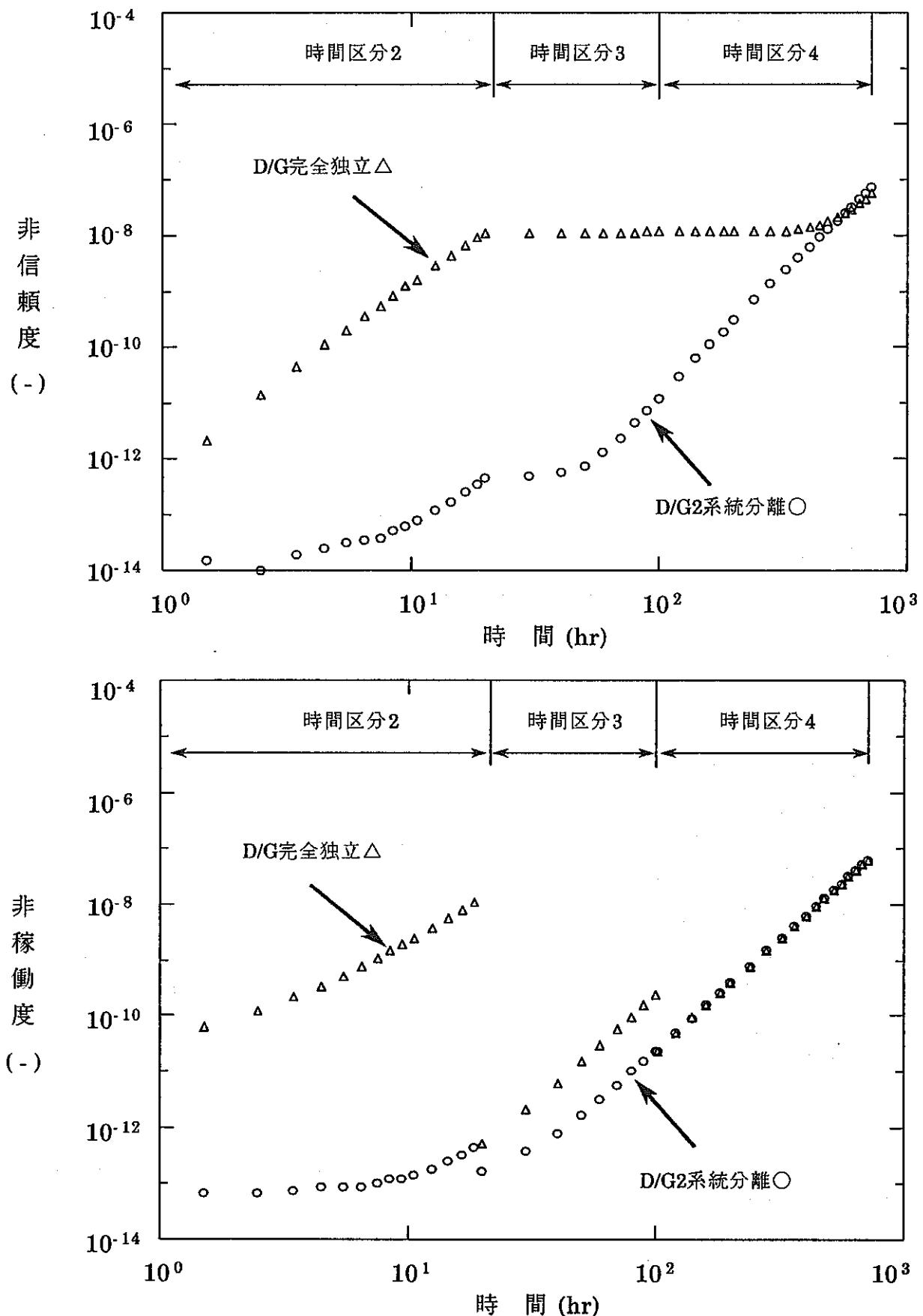


図4-9 IRACS信頼性評価結果 [CASE4-5]

## 5. リファレンスプラントでのPRACS信頼度予備評価

### 5.1 概 要

プラント工学室では、昭和63年度より現状において成立可能な技術、及び今後のR&Dにより成立性が十分期待できる技術(2000年以前にプラント着工が可能な技術)で構成するリファレンスプラント設計研究を開始した。

リファレンスプラントの崩壊熱除去系としては、2次冷却系以降を非安全系とするため、図5-1に示すようなIHXの上部プレナム内に冷却コイルを挿入したPRACS(Primary Reactor Auxiliary Cooling System)の採用を検討している。PRACSの概要を以下に示す。

PRACSは4ループ構成であり、除熱方式としては強制循環除熱(F/C除熱)方式を採用している。

外部電源が喪失した場合には、プラントに2台設置(2系統分離)された非常用D/Gを起動することにより、1次主冷却系ポンプ、PRACS2次系の電磁ポンプ、及びA/Cのプロワといった動的機器に給電でき、強制循環除熱を維持できる。

さらに非常用D/Gの起動失敗などに起因する動的機器不作動時においても、配管等の静的機器が健全であれば、炉心とDHXコイル、DHXコイルとA/Cの間の伝熱中心差を十分とることにより、自然循環除熱(N/C除熱)が確保できる設計としている。

サイジング時のPRACS除熱容量は、以下のように設定した。

- a)「1ループ冷却材漏洩+1ループ空気冷却器ダンパ不作動」を想定し、2ループ強制循環(F/C)除熱モードから、F/C除熱時には15MWt/基とする。
- b)「全動力電源喪失」を想定し、4ループ自然循環(N/C)除熱モードから、N/C除熱時は6.5MWt/基とする。
- c)さらに除熱容量としては最も厳しくなる「1ループ冷却材漏洩+外部電源喪失時の非常用D/G単一故障」を想定した、1ループF/C除熱+2ループN/C除熱モードでは、冷却材バウンダリ制限温度をわずかに上回るが、温度上昇による除熱能力の向上が期待できるため、設定した除熱容量でも冷却材バウンダリの健全性は確保できる見通しである。

したがって、除熱容量はF/C除熱時15MWt/基、N/C除熱時6.5MWt/基としている。

そこで、このリファレンスプラントのPRACSを対象に、DRAC02コードを用いて外部電源喪失時の作動要求あたりの信頼度を評価した。

## 5.2 解析条件

### (1) 必要除熱量の推移

図5-2は、崩壊熱除去系に要求される必要除熱量の推移を示したものである。図中の実線は、FPGSコードで計算された2600MWt炉心の崩壊熱出力(BACCHUSで使用)を表しており、この崩壊熱を包絡するように、必要除熱量を設定した。(リファレンスプラントでは、プラント熱効率の向上に伴って、電気出力は1000MWeであるが、熱出力が2517MWtとなり、従来の熱出力からわずかに低下したため、必要除熱量は保守側の設定となっている。)

また必要除熱量を確保するための、サクセス・クライテリア(必要ループ数)を表5-1に示す。なお前章で述べたように現状のDRAC02コードでは、括弧つきのAND条件となる時間区分2のサクセス・クライテリアは、そのまま扱うことはできないため、つぎのように変更している。

表5-2は、時間区分2のサクセス・クライテリアにおいて、プラントが取りうる除熱モードを示したものである。各ループが取りうる除熱モードは、後述するように、F/C除熱、N/C除熱、及び除熱不能の3つの状態があり、またプラントは4ループ構成となっているため、プラントが取りうる状態は  $3^4 = 81$  状態となる。

表5-2に示すように、2F/C以上は33状態、1F/C & 2N/C以上は16状態、4N/C以上は1状態となり、時間区分2では、81状態中50状態がサクセス・クライテリアを満足する。前述のように、DRAC02での入力では、[2F/C or 4N/C or (1F/C & 2N/C)]は扱えないため、4N/C以上は1状態とサクセス・クライテリアのなかでは影響度が小さいと考え、今回の解析では時間区分2の4ループN/C除熱については考慮していない。

### (2) PRACSのモデル化

表5-3～5-5は、PRACSの解析モデルを示したものである。F/C除熱方式では、1次系静的機器(配管、弁等)、1次系動的機器(主循環ポンプ)、PRACS2次系静的機器、PRACS2次系動的機器(電磁ポンプ、空気冷却器プロワ)、空気冷却器(ダンパ)、及び非常用D/Gの6コンポーネントで構成した。

サブシステムとしては、1次系静的機器から空気冷却器までの5つのコンポーネントから構成される崩壊熱除去系(DHRS)と、非常用D/G(従属故障モードの取扱い)の2種類となる。サブシステムDHRSの機能としては、強制循環除熱、自然循環除熱、及び除熱不能の3つに分類される。

また表5-6に、PRACS各コンポーネントの起動失敗確率、故障率、及び修復率を示す。(解析当初は、空気冷却器プロワを独立したコンポーネントとして扱うことにしていました。しかし、1次系主循環ポンプ、PRACS2次系電磁ポンプ、及び空気冷却器プロワと非常用D/Gに接続する従属コンポーネントが3つになると、サブシステムの状態数をカウントし、そのアドレスを記憶する配列がオーバーフローしてしまい、ユーザの使用できる最大10MBまで拡張しても計算不能になってしまった。このため、PRACS2次系動的機器としては、電磁ポンプとプロワのorを取り、コンポーネントの故障率データ等は、2つのコンポーネントのデータを足しあわせている。)

### 5.3 解析結果

#### (1)DRACコードの結果

図5-3は、外部電源喪失時におけるPRACS作動要求1回当たりの非信頼度、非稼働度を、非常用D/Gの冗長性をパラメータに比較したものである。図中の□が非常用D/G2台(2系統分離)、○が非常用D/G4台(完全独立)のケースを示しており、両ケースとも表5-1に示したサクセス・クライテリアで評価している。

非信頼度は、いずれのケースとも時間区分2までは増加しているが、それ以降はほぼ一定値に落ちている。これはサクセス・クライテリアの緩和に伴って、クライテリアを満足するプラント状態が、表5-2に示した時間区分2では49通り/81通りであるのに対し、時間区分3では76通り/81通り、さらに時間区分4では80通り/81通りと次第に多くなることによるものと思われる。したがって、720時間の使命時間を通しても非信頼度は、時間区分2までの非信頼度でほぼ規定されることになる。なお非常用D/G4台のケースでは、非信頼度が500時間以降からわずかに増加していくが、これはシステム全体の故障率が非常用D/G2台のケースより大きいためであると思われる。

使命時間とした720時間の時点における非信頼度は、本プラントで採用する非常用D/G2台のケースで $3.6 \times 10^{-8}/\text{demand}$ となり、信頼度目標とした $10^{-7} \sim 10^{-8}/\text{demand}$ を満足する結果となった。また非常用D/Gを4台として冗長性を高めたケースでは、 $6.3 \times 10^{-11}/\text{demand}$ となり、約3オーダ程度信頼度が向上することがわかった。

なお非稼働度は、非常用D/GとA/Cの修復を考慮して算出している。図5-3に示すように、時間区分が変わる時点で、非稼働度は不連続的に低下し、非常用D/Gの冗長性によらず両ケースとも720時間の時点では $2.8 \times 10^{-11}/\text{demand}$ となる。

#### (2)非常用D/G4台とした場合の得失

前項で述べたように、非常用D/Gを4台に増加させ冗長性を高めた場合には、約3オーダ程度非信頼度を低減できることがわかった。

非常用D/Gを4台とした場合の除熱モードを、2台の場合と比較して表5-7に示す。

この表からわかるように、非常用D/Gを4台にすると、非常用D/G故障時において、N/C除熱の1ループがF/C除熱に変わるが、除熱容量として最も厳しくなる事象は、以下の2事象となる。

- ①「1ループ冷却材漏洩+A/C1基のダンバ故障 = 2ループF/C除熱」
- ②「全動力電源喪失 = 4ループN/C除熱」

このため非常用D/G台数が増えても、サイジング時の除熱容量は、非常用D/G2台の場合と同様に、F/C除熱時15MWt/基、N/C除熱時6.5MWt/基となることが予想される。

したがってPRACSの信頼性は非常に向上するが、1基あたりの除熱容量の低減効果は期待できない。さらには定量的な評価が必要であるが、非常用D/G台数を増加させることによるコストの増大や、配置上の制約が厳しくなるかもしれないため、非常用D/G4台のシステム構成のメリットは当初期待していたほど大きくないと思われる。

#### 5.4 結論

リファレンスプラントの崩壊熱除去系に選定したPRACSを対象に、DRAC02を用い、外部電源喪失時の作動要求あたりの信頼度を評価し、以下の結果が得られた。

- ①非常用D/G2台としたケースでは、720時間の時点における非信頼度が $3.6 \times 10^{-8}/\text{demand}$ となり、信頼度目標 $10^{-7} \sim 10^{-8}/\text{demand}$ を満足する。
- ②非常用D/Gを4台として冗長性を高めたケースでは、 $6.3 \times 10^{-11}/\text{demand}$ となり、約3オーダ程度信頼度が向上する。

なお非常用D/Gを4台としても、安全評価上は冷却材漏洩事故時に、A/Cダンバの單一故障を想定させられるため、除熱容量の低減効果は期待できず、信頼度は向上するが、非常用D/G4台のシステム構成のメリットは大きくなかった。

今後の課題としては、以下の2項目についての評価が必要である。

- a)プラント過渡特性コードにより、各時間区分でのPRACS必要除熱量を求め、暫定的に設定しているサクセス・クライテリアの詳細化
- b)非常用D/G設備の定量的なコスト評価、及び配置設計への影響評価

表5-1 PRACSのサクセス・クライテリア

時間区分	必要除熱量	必要ループ数
3~20hr	30MWt	F/C 2ループ以上 OR N/C 4ループ以上 OR F/C 1&N/C 2ループ以上
20~100hr	15MWt	F/C 1ループ以上 OR N/C 2ループ以上
100~720hr	7.5MWt	F/C 1ループ以上 OR N/C 1ループ以上

表5-2 サクセス・クライテリアを満足するプラント状態数[時間区分2]

除熱モード	組合せ状態数
4 F/C	$4! / 4! = 1$
3 F/C & 1 N/C	$4! / (3! \cdot 1!) = 4$
3 F/C & 1 除熱不能	$4! / (3! \cdot 1!) = 4$
2 F/C & 2 N/C	$4! / (2! \cdot 2!) = 6$
2 F/C & 2 除熱不能	$4! / (2! \cdot 2!) = 6$
2 F/C & 1 N/C & 1 除熱不能	$4! / (2! \cdot 1! \cdot 1!) = 12$
2 F/C 以上	33状態
1 F/C & 3 N/C	$4! / (1! \cdot 3!) = 4$
1 F/C & 2 N/C & 1 除熱不能	$4! / (1! \cdot 2! \cdot 1!) = 12$
1 F/C & 2 N/C 以上	16状態
4 N/C	$4! / 4! = 1$
4 N/C 以上	1状態
計	50状態 / 81 (= 3 <sup>4</sup> )状態

表5-3 PRACSコンポーネントの選定

iCMP	コンポーネント名	略号	備考
1	1次系静的機器	PSP1	配管, ポンプ, IHX, 逆止弁からの漏洩
2	1次系動的機器	PDC1	主循環ポンプ(流路パスを阻害しない故障)
3	PRACS2次系静的機器	DHSP1	配管, IHX内コイル, ACS, 電磁ポンプ, 膨張タンク, 弁からの漏洩
4	PRACS2次系動的機器	DHDC1	電磁ポンプ、空気冷却器ブロワ (流路パスを阻害しない故障)
5	空気冷却器	ADC1	出入口ダンパ, 入口ベーン
6	ディーゼル発電機	EDC1	2ループに1基のD/Gが設置

表5-4 PRACSサブシステムの選定

iSS	サブシステム名	略号	構成するコンポーネント
1	崩壊熱除去系	DHRS	iCMP=1, 2, 3, 4, 5
2	非常用ディーゼル	DG	iCMP=6

表5-5 PRACSサブシステムの機能分類

分類番号 iSSS	保持している機能	コンポーネント状態
1	PRACSによる強制循環可能	iCMP=1~5 すべて健全
2	PRACSによる自然循環可能	iCMP=1, 3, 5 が健全
3	除熱不能	上記以外

表5-6 PRACSコンポーネントの起動失敗確率、故障率、修復率

項目	起動失敗確率(/demand)	故障率( $\times 10^{-6}/hr$ )	修復率(/hr)
1次系静的機器	0.0	1.3	0.0
1次系動的機器	$3.0 \times 10^{-4}$	1.5	0.0
PRACS2次系静的機器	0.0	1.9	0.0
PRACS2次系動的機器	$5.0 \times 10^{-5}$	2.0	0.0
A/C	$1.0 \times 10^{-3}$	0.9	0.20
D/G	$1.2 \times 10^{-3}$	10.0	0.05

表5-7 PRACSの除熱モード

起因事象	(单一)故障	除熱モード	事象区分	サイジング条件
D/G2台の場合				
外部電源喪失	D/G	2F + 2N	III	
ポンプ軸固着	A/Cダンパ	2F + 1N	III	
	D/G	1F + 3N	IV*	
冷却材漏洩事故	A/Cダンパ	2F + 0N	IV	○
	D/G	1F + 2N	IV*	○
全動力電源喪失		4N	IV*	○
	A/Cダンパ	3N	IV**	
<hr/>				
D/G4台の場合				
外部電源喪失	D/G	3F + 1N	III	
ポンプ軸固着	A/Cダンパ	2F + 1N	III	
	D/G	2F + 2N	IV*	
冷却材漏洩事故	A/Cダンパ	2F + 0N	IV	○
	D/G	2F + 1N	IV*	
全動力電源喪失		4N	IV*	○
	A/Cダンパ	3N	IV**	

IV\*、IV\*\*は、IVよりも厳しい事象として考える。

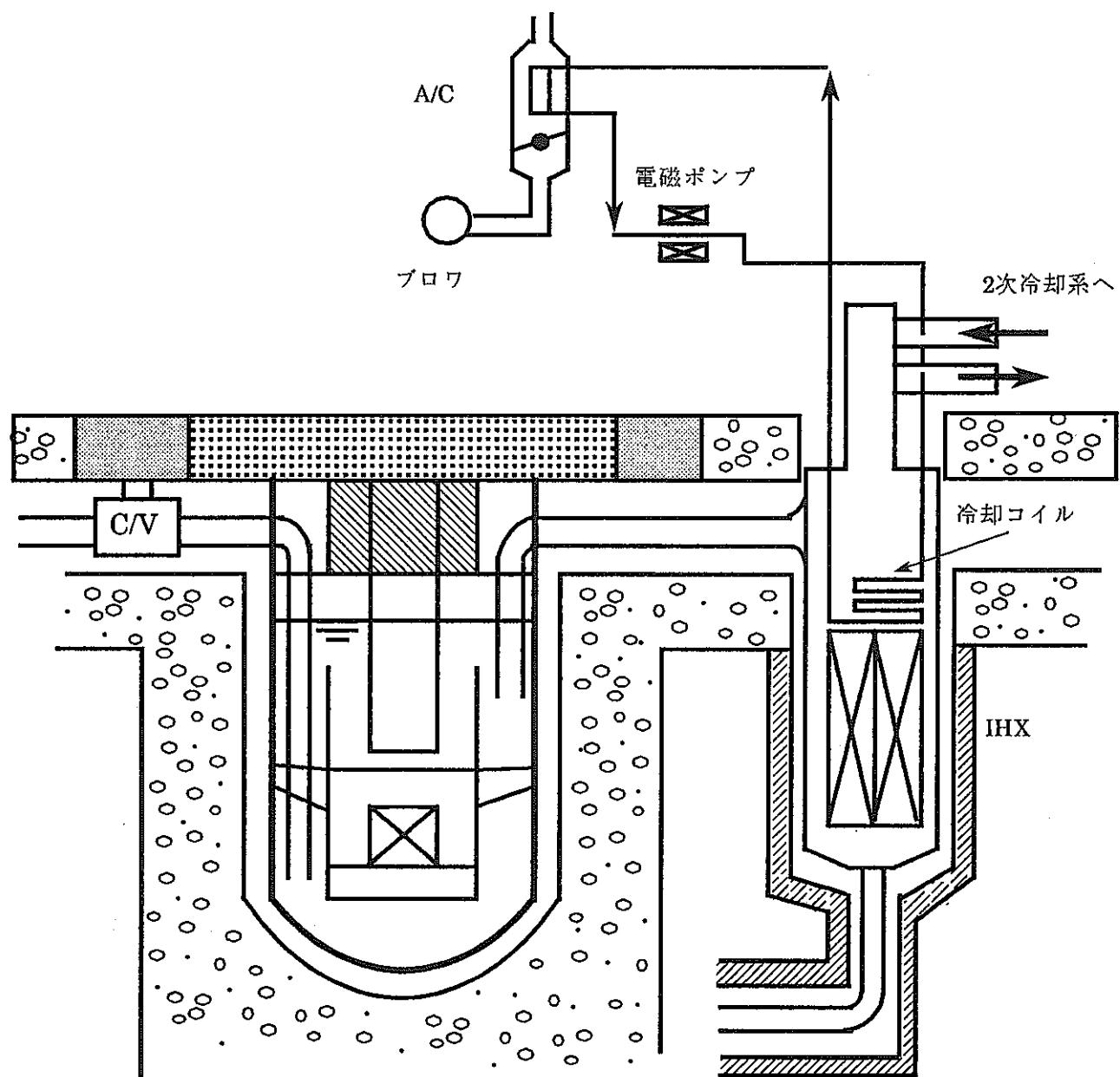


図5-1 PRACSの概要

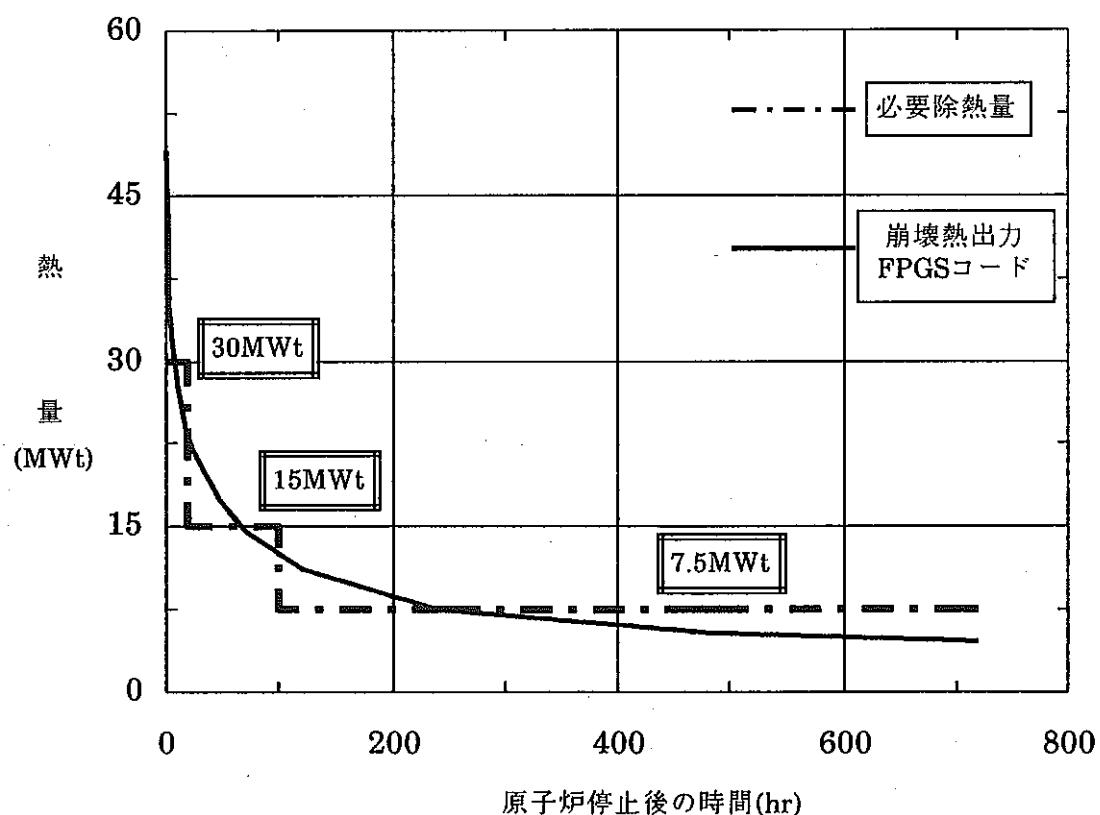


図5-2 必要除熱量の推移

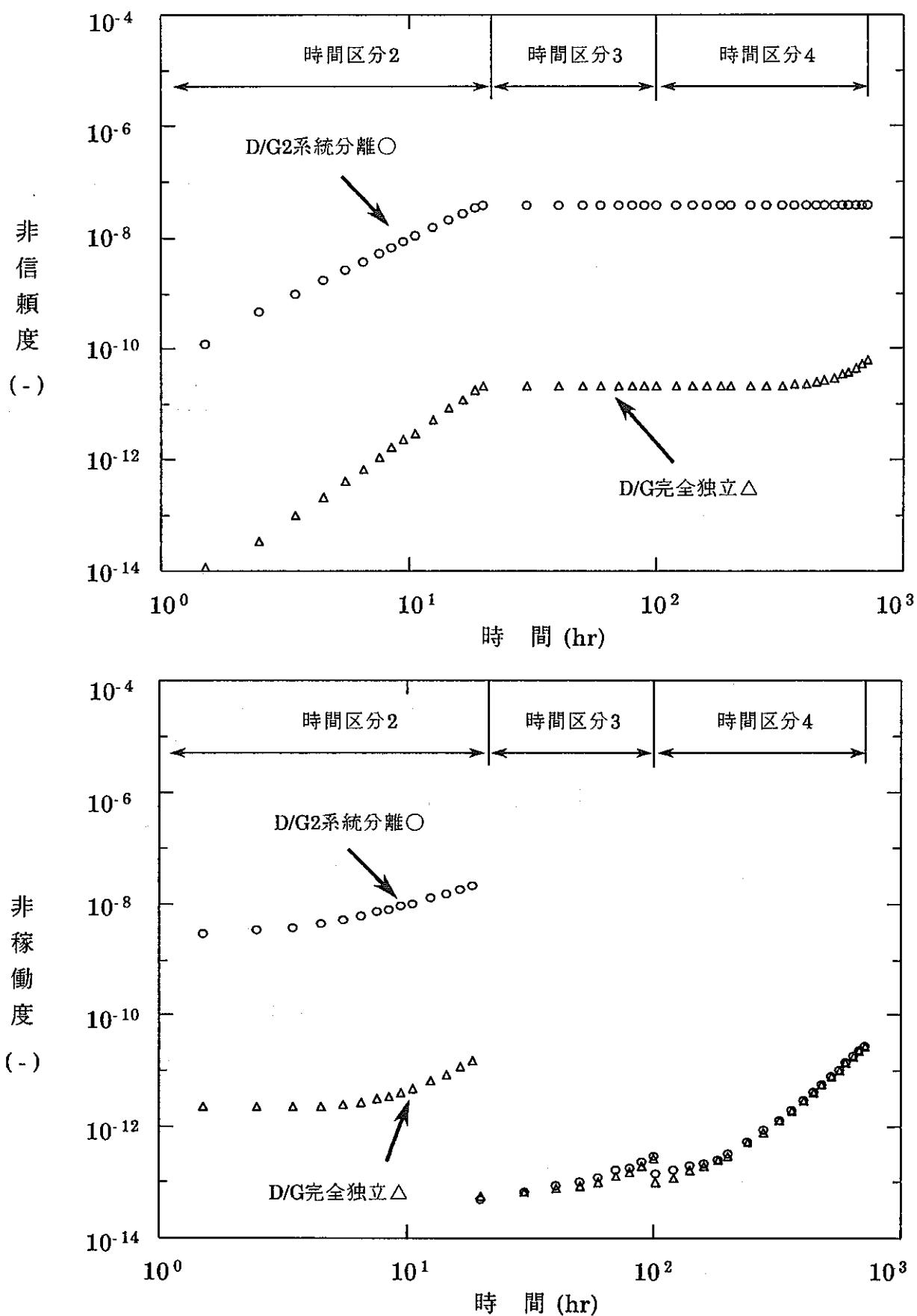


図5-3 PRACS信頼性予備解析結果

## 6. 実機プラント設計への反映

第2章、第3章では、非常用D/Gと崩壊熱除去系の2種類のコンポーネントから構成されるモデルを対象として、系統分離や、サクセス・クライテリアがシステムの信頼度にどのように影響するかについて評価してきた。

また第4章、第5章では、60年度要素技術設計研究(II)のIRACSを対象とした信頼度評価や、現在進めているリファレンスプラントのPRACSを対象とした予備解析も行った。

そこでこれまでの信頼度評価結果をもとに、実機プラントの崩壊熱除去系の構成について考察した。

### (1) プラント構成(前提条件)

プラント型式	ループ型炉、4ループ構成
崩壊熱除去系	4系統、強制循環除熱方式(自然循環除熱は可能とする)

### (2) 電源系統

「もんじゅ」の安全設計方針に記載されている、以下の指針に基づくものとする。

#### 『方針9. 系統の単一故障』

安全上重要な系統は、非常用所内電源系のみの運転下または外部電源系のみの運転下で、単一故障を仮定しても、その系統の安全機能を失うことのない設計であること。

このため非常用D/Gが1台の場合には、非常用D/G1台の故障のみで崩壊熱除去系全系統の強制循環除熱能力が喪失するため、完全従属[1/4]のシステム構成は実機ではありえない。

また非常用D/Gが複数台設置されていても、電源系統の単一故障により、それに接続する崩壊熱除去系の強制循環除熱能力が喪失するため、サクセス・クライテリア4系統を要求するようなシステム構成も排除される。

非常用D/G2台の場合には、どちらか1台の故障で接続する2系統のDHRSの強制循環除熱能力が喪失するので、サクセス・クライテリアが3系統以上という条件は排除される。

なお図3-1に示したように、2系統分離[2/4]のシステム構成で、サクセス・クライテリア3系統以上を要求される場合には、完全従属[1/4]のシステム構成よりも信頼度が低下する傾向にある。このため、2系統分離のシステム構成で、3系統以上というサクセス・クライテリアを要求するのは、信頼性上好ましくない設計であることがわかる。

したがって選択可能なシステム構成としては、次の組合せとなる。

非常用D/Gの台数	2台(2系統分離)、または4台(完全独立)
サクセス・クライテリア	D/G2台の場合→DHRS1系統以上、または2系統以上
	D/G4台の場合→DHRS1系統以上～3系統以上

### (3)除熱モードの影響

前章の表5-7は、リファレンスプラントの崩壊熱除去系に選定したPRACSを対象として、過渡・事故時において要求される除熱モードを示したものである。

#### a)非常用D/G2台の場合(2系統分離)

崩壊熱除去系を強制循環除熱方式とすると、非常用D/Gが2台の場合には、次の2つの事象が除熱容量として最も厳しくなる。

- ①「冷却材漏洩事故+A/Cダンパの単一故障」 → 2ループ強制循環除熱
- ②「冷却材漏洩事故+非常用D/Gの単一故障」  
→ 1ループ強制循環除熱+故障した非常用D/Gに接続する2ループ自然循環除熱

②の事象において、故障した非常用D/Gに接続する2ループの自然循環除熱能力を期待しなければ、60年度設計のIRACSでのサイジング条件である、1ループ強制循環除熱のみとなり、除熱容量としては、[100%×4系統]が要求される。しかしリファレンスプラントでは、逆止弁の特性を考慮しても、1ループの強制循環と2ループの自然循環が共存する見通しが得られた。このため、設備容量の合理化を図ることができ、[50%×4系統]の構成を採用し、除熱容量としては15MWt/基となっている。

なお②の事象で、故障した非常用D/Gに接続する2ループの自然循環除熱量は、1ループの強制循環除熱量には及ばないという考え方もあり(タンク型炉設計例では、2ループ自然循環除熱量は、1ループの強制循環除熱量×0.7としている)、冷却材バウンダリの判断基準が高温での保持時間を含めて合理化されてきているが(650°C→700°C、1000時間)、余裕を見込めば[60%×4系統]程度が妥当かもしれない。

また①、②の事象を満足するように設定されていても、非常用D/Gの共通原因故障等により

- ③「全動力電源喪失」 → 4ループ自然循環除熱  
にも対応できる設備容量であることが要求される。

#### b)非常用D/G4台の場合(完全独立)

一方、非常用D/Gが4台の場合には、次の事象が最も除熱容量として厳しくなる。

- 「冷却材漏洩事故+A/Cダンパの単一故障」 → 2ループ強制循環除熱

このため非常用D/Gの冗長性を高めても、A/Cダンパの単一故障により、強制循環除熱方式のサイジング条件としては、非常用D/G2台と同じになる。

したがって、この除熱モードから考えると、原子炉停止後1日程度の初期の段階において、必要除熱量30MWtを満足するサイジング上の必要ループ数はDHRS2系統となるため、DHRS1系統以上(1ループ強制循環除熱を想定)と3系統以上(3ループ強制循環除熱を想定)というサクセス・クライテリアは排除される。

また非常用D/Gの信頼性が、他の機器よりも低く、「全動力電源喪失」も想定させられるため、4ループ自然循環除熱も要求される。

したがって除熱容量としては、3ループ強制循環除熱を想定した[33%×4系統]へ低減できず、非常用D/G2台と同様、[50%×4系統]が要求される。また4台に増加することに伴って、コストおよび配置上の制約も大きくなることが予想されるので、非常用D/Gの台数としては2台とすることが望ましいと考える。

#### (4)まとめ

以上の考察より、ループ型炉で4ループ構成のプラントに適用する、強制循環除熱方式の崩壊熱除去系としては、次のようなシステム構成が望ましいと考えられる。

非常用D/Gを2台設置した2系統分離の構成で、除熱容量は[50%以上×4系統]とする。また全動力電源喪失時には、4系統の自然循環除熱により崩壊熱除去が可能であるとする。

なおこのシステム構成で、信頼度目標を達成できない場合には、サイジング条件としてクリティカルになっている、以下のような機器の設計対応が必要と考えられる。

- ①非常用D/Gの台数を4台とする。(除熱容量は低減できないが、信頼度は向上する。)
- ②A/Cのダンパの信頼性向上(無停電電源への接続や、フェイルセーフ機構の採用により、ダンパに高度の信頼度が期待できれば、3ループ強制循環が可能となり、除熱容量低減も期待できる。)

## 7.まとめと今後の課題

### 7.1 検討結果のまとめ

#### (1)動的信頼性評価コードDRAC02の検証

前報のテスト計算で用いた非常用D/Gから給電される強制循環除熱方式の4系統の崩壊熱除去系(DHRS)から構成されるプラントを対象として、非常用D/Gの冗長性が異なる3種類のシステム(完全独立[4/4]、2系統分離[2/4]、完全従属[1/4])の信頼度解析結果を、従来手法であるフォールト・ツリー解析(FTA)結果と比較し、以下の結果が得られた。

- ① 使用した故障率データ、またはサクセス・クライティアによっては、コンポーネント数の違いが影響し、前報に示したように冗長性の高いシステムのほうが、FTAでも信頼度が低くなる場合がある。
- ② DRAC02コードの結果は、FTAの結果とほぼ一致しており、時間区分を与えない場合でのマルコフ・モデルに関する計算手法の妥当性を検証した。

#### (2)システム重要度評価

3種類のシステム構成(完全独立[4/4]、2系統分離[2/4]、完全従属[1/4])を対象に、非常用D/Gに着目して、SETSコード、及びIMPROVEコードを用いて、システムの重要度を評価し、以下の結果が得られた。

- ① 従属する非常用D/Gの故障がシステム故障に与える影響の大きさを、リスク増加価値、リスク減少価値のプロファイルの変化として、定量的・視覚的に把握できた。
- ② 前章でのDRAC02コードの信頼度解析結果が、この重要度評価によりさらに信頼性の観点からみたシステム特性が明確になった。

#### (3)IRACS信頼度評価

60年度要素技術設計研究(II)の崩壊熱除去系に選定したIRACSを対象に、系統分離、自然循環除熱の有効性、及び除熱容量等をパラメータとして信頼度を評価し、以下の結果が得られた。

- ① 自然循環除熱のクレジットを考慮すると、2系統分離の場合、1回の作動要求あたりの信頼度は、約2オーダ程度向上する。
- ② 同一のサクセス・クライティアで比較した場合、非常用D/GとDHRSの系統構成を2系統分離から、完全独立としても、自然循環除熱が可能であれば、使命時間720hrでの信頼度は、ほぼ等しくなる。
- ③ 完全独立の場合の除熱容量を、2系統分離の除熱容量の1/2とした場合には、完全独立のほうがわずかに信頼度が向上する。
- ④ 外部電源喪失時のdemandあたりの非信頼度は、信頼度目標 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ /demandの範囲にある。

#### (4)PRACS信頼度予備評価

63年度リファレンスプラント設計研究の崩壊熱除去系に選定したPRACSを対象に、DRAC02を用い、外部電源喪失時の作動要求あたりの信頼度を評価し、以下の結果が得られた。

- ①非常用D/Gを2台とした場合、720時間の時点における非信頼度が $3.6 \times 10^{-8}/\text{demand}$ となり、信頼度目標 $10^{-7} \sim 10^{-8}/\text{demand}$ を満足する。
- ②非常用D/Gを4台として冗長性を高めたケースでは、 $6.3 \times 10^{-11}/\text{demand}$ となり、約3オーダ程度信頼度が向上する。
- ③非常用D/Gを4台としても、安全評価上は冷却材漏洩事故時に、A/Cダンパの単一故障を想定させられるため、除熱容量の低減効果は期待できず、信頼度は向上するが、非常用D/G4台のシステム構成のメリットは大きくない。

#### (5)実機プラント設計への反映

以上の信頼度評価結果をもとに、ループ型炉で4ループ構成のプラントに適用する強制循環除熱方式の崩壊熱除去系としては、次のようなシステム構成が望ましいと考えられる。

非常用D/Gを2台設置した2系統分離の構成で、除熱容量は[50%以上×4系統]とする。また全動力電源喪失時には、4系統の自然循環除熱により崩壊熱除去が可能であるとする。

なおこのシステム構成で、信頼度目標を達成できない場合には、サイジング条件としてクリティカルになっている、以下のような機器の設計対応が必要と考えられる。

- ①非常用D/Gの台数を4台とする。(除熱容量は低減できないが、信頼度は向上する。)
- ②A/Cのダンパの信頼性向上(無停電電源への接続や、フェイルセーフ機構の採用により、ダンパに高度の信頼度が期待できれば、3ループ強制循環が可能となり、除熱容量低減も期待できる。)

## 7.2 今後の課題

### (1)非常用D/Gの冗長性が異なる3種類のシステムの信頼度評価

さらに厳密に3種類のシステムの信頼度を比較するには、次の検討課題が残されている。

- ①系統分離による機器の設備容量の違いを故障率データ、あるいはサクセス・クライティリアに反映した評価
- ②共通原因故障の取扱い

### (2)DRAC02コードの改良

DRAC02コードを用いて、崩壊熱除去系の信頼度をさらに精度良く評価するために、今後以下の計算モデルを改良する予定である。

- ①時間区分が変わる時点での非信頼度計算モデル
- ②サクセス・クライティリアの[かっこつきAND]条件の取扱い
- ③非常用D/Gのような共用機器に接続するコンポーネント数の増大
- ④共用機器を対象とした重要度評価モデルの追加

### (3)PRACS信頼度評価の詳細化

- ①プラント過渡特性コードにより、各時間区分でのPRACS必要除熱量を求め、暫定的に設定しているサクセス・クライティリアの詳細化
- ②CREDOデータベース<sup>10)</sup>を活用した故障率データの整備

## 8. 謝 辞

本研究を実施するにあたって、日立エンジニアリング株式会社の三浦聰志氏には、DRAC02コードの解析結果の妥当性等について多くの助言や有益な討論をして頂きました。

また動力炉研究開発本部安全研究Gr.(現在大洗工学センター技術開発部システム解析室)の方々にも、DRAC02コードの解析結果の妥当性や、SETSコードの使用法に関し、多くの助言を頂きました。

ここに謝意を表します。

## 9. 参考文献

- (1) 藤井 他,「高速増殖大型炉の設計主要目に関する研究(II) 崩壊熱除去系の動的信頼性評価手法の開発」,PNC SN9410 88-062,1988年6月
- (2) 動力炉研究開発本部 安全研究Gr.,「SETSマニュアル第1版」,PNC N2520 88-002,1988年3月
- (3) 高橋 他,「SETS後処理プログラムの開発」,PNC SJ2222 87-001,1987年3月
- (4) 高速増殖炉開発本部 建設計画部 ,「「もんじゅ」の崩壊熱除去系の設計評価」,動力炉技報 No.40,1981年12月
- (5) USAEC, "Reactor Safety Study", WASH - 1400, August, 1974
- (6) 新居 ,「非常用ディーゼルの故障について」, 第3回確率論的安全評価(PSA)に関する国内シンポジウム論文集,1988年12月
- (7) 上出 他,「高速増殖大型炉の設計主要目に関する研究(I) - LEDHERコードの開発と自然循環除熱能力の検討 - 」,PNC SN9410 87-132,1987年10月
- (8) 米川 他,「高速増殖大型炉の設計主要目に関する研究(II) プラント熱過渡に関するパラメータサーベイ(II)」,PNC N9410 88-087,1988年7月
- (9) 山口 ,「昭和60年度要素技術設計研究 崩壊熱除去系の信頼性の検討」,PNC N9410 86-026,1986年3月
- (10) 濑戸口 ,「高速炉プラント信頼性評価用データベースの開発 - FREEDOM/CREDOの開発・整備 - 」,第2回確率論的安全評価(PSA)に関する国内シンポジウム論文集,1987年12月