

Living PSAにおける計算高速化手法の開発

— ミニマルパスセットを利用したカットセットベース計算手法の改良 —

1996年11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下さい。

〒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

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to : Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-machi, 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) 1996

Living PSAにおける計算高速化手法の開発
—ミニマルパスセットを利用したカットセットベース計算手法の改良—

三原 隆嗣*

要旨

Living PSAの適用例の1つとして、系統運用構成の変化に伴うリスクレベルの変動を迅速に評価するシステムの開発を進めている。計算高速化の手法としては、既に導出済のミニマルカットセット(*1)（以下mcs）に対して停止中の系統の素事象にΩを代入し（発生確率=1とする）、ブール代数処理により新たな系統運用構成に対応するmcsを導出するカットセットベースの計算手法がある。しかし、データ容量制限のため、確率値に基づく裾切り処理により削除された項が、系統運用構成の種類によっては重要となる可能性もあることから、結果の正確さの点で問題が生ずる可能性がある。この様な問題に対処するため以下のようない改良計算手法：MPS法を考案した。

(1) 系統運用構成別カットセットデータの準備

- 評価システムの稼働に必要となる電源系等のサポート系統の最小限の組み合わせを表現するミニマルパスセットを導出する。ミニマルパスセットは、 ΣMPS_i (MPS_i は系統運転成功の積事象) の様にミニマルパスセット項: MPS_i の論理和として表現される。
- 各々のミニマルパスセット項に対応する個々のプラント系統運用状態の下で評価システムのmcsを導出する。適切な裾切り値の設定により、当該系統運用状態の下で発生確率の点から重要となるmcs項の抜け落ちを防止することができる。

(2) 特定の系統運用構成条件に対するミニマルカットセットの導出

- ある特定の系統運用構成は、評価システムのミニマルパスセット中の何れかの項のブール代数和として表現できることになり、対応するミニマルパスセット項を選択する。
- 選択されたミニマルパスセット項に対応するmcs ((1)で導出) についてそれらの積事象を作り、ブール代数演算により縮約・簡単化を行えば、その結果が特定の系統運用構成の下でのmcsとなる。

このMPS法を高速炉モデルプラントの停止時崩壊熱除去系の信頼性評価に適用した。フォールトツリー手法や従来のカットセットベース手法による計算結果との比較から、MPS法の有効性を確認した。

(*1) 評価対象システムが機能喪失となるための、機器故障や人的エラー等の必要最小限の組み合わせであり、 $mcs = \Sigma mcs_i$ (各々の項: mcs_i は素事象の積事象。例えば、 $mcs_j = \text{機器A故障} \times \text{機器B故障}$) のようにブール代数式で表現される。

Development of the fast minimal cut sets calculation method for Living PSA application

- Improving the pre-deduced minimal cut sets method with success pass sets -

Takatsugu Mihara*

Abstract

The plant configuration control system is being developed as one of the application of Living PSA. In order to evaluate risk measures, such as core damage frequency, among many kinds of plant configurations, shorter Boolean calculation time is favorable. One of the way to reduce the calculation time is the recalculation method based on the minimal cut set (MCS) data, not on the fault tree data. However, some of the truncated cut set terms may be important in some specific plant configurations. Therefore, this method has possibility to miss the important cut set terms and to get invalid risk measures. To avoid invalidity with this method, the way to improve the recalculation method was developed. The step of the development method is shown below.

1. Cut set data preparation

- For the safety systems to be evaluated, deducing the minimal pass sets that stand for minimal combinations of the support systems that are needed to make the safety system function. These minimal pass sets are represented in the form of boolean algebra using symbols that refer to the support systems.
- Calculating the MCS data for the safety systems based on the each plant configuration identified with the each minimal pass set term.

2. Risk evaluation with specific plant configuration

- Any plant configurations to be evaluated can be represented in the form of the sum of the some minimal pass set terms identified above. Selecting the such minimal pass set terms matching the specific plant configuration to be evaluated.
- Identifying the MCS data corresponding to the minimal pass set terms selected in the previous step.
- Multiplying these MCS and simplifying with Boolean algebra, then we can get the MCS correspond to the configuration.

Applying this method to the reliability analysis of the decay heat removal system of an LMFBR model plant, and compared with the fault tree calculation method, the validity of this method was assured.

* Safety and Reliability Research Section, Advanced Technology Division, O-arai Engineering Center

目次

1. 手法開発の必要性
2. ミニマルカットセットベース手法の改良
 2. 1 手法改善のための着眼点
 2. 2 改良手法：MPS法の概要
 2. 3 MPS法による計算手順
3. 高速炉モデルプラントへの適用
 3. 1 ミニマルパスセットの導出
 3. 2 ミニマルカットセットデータの導出
 3. 3 崩壊熱除去系機能喪失確率の評価
4. 考察
5. 結論
6. 参考文献

謝辞

- Appendix A 高速炉モデルプラント崩壊熱除去系のサポート系統単位のサクセスパス
ツリ一
- Appendix B 高速炉モデルプラント崩壊熱除去系のサポート系統単位のミニマルパス
セット

図表リスト

図2-1 特定システムの稼働条件とサポート系統構成

図2-2 改良手法：MPS法による計算手順

図3-1 モデルプラント系統従属性 (1/2)

図3-2 モデルプラント系統従属性 (2/2)

図4-1 従来カットセットベース手法との比較 -F/T手法解との比とカットセットデータ導出時の裾切り値

図4-2 ランダム機器故障発生時の評価

図4-3 計算時間の比較

表3-1 系統運用とフェイズ分類

表3-2 適用計算の結果とF/T手法との比較

1. 手法開発の必要性

原子力発電プラントのPSAで得られた信頼性モデル等を基にして、系統運用構成（運用中orアウテージ中の組み合わせ）の変化に伴うリスク指標の変動を迅速に評価するリビングPSAシステム（[1], [2], [3]）の開発を進めている。このようなシステムの活用策としては、プラントの定検期間中の系統運用計画検討時に種々の運用計画候補の間で炉心損傷発生頻度等のリスク指標を比較することにより、安全上の観点からの判断材料を提供することが考えられるが、多数の運用計画案に対するリスク指標が迅速に計算できる機能を有する必要がある。また、プラントのリスクモニターとして、機器故障によりある系統がアウテージ状態になった場合にリスクの変動を再計算し、重要度評価から安全上重要な機器を同定する等してどのようなアクションを取るべきかを検討することにも活用できるが、数分以内で計算処理が終了することが望ましい。

炉心損傷発生頻度等のリスク指標は、イベントツリー（E/T）、フォールトツリー（F/T）等のプラントの信頼性モデルから計算される。種々のプラントの系統構成に伴うリスク指標は、F/Tモデル上でアウテージとなった系統にブール代数的に Ω を代入してF/T構造を変更し、ブール代数演算処理によりミニマルカットセットを導出して、機能喪失確率や炉心損傷発生頻度等の定量値を求めることで評価できる。例えば、サポート系統である補機冷却海水系A、ディーゼル発電機Aがアウテージ状態であれば、この2つの系統は確率1で失敗状態であるから、F/Tモデル上で対応する展開事象に Ω を代入してF/Tモデルの構成を変更して計算を実行すればよい。しかし、実機プラントモデルのような大規模な信頼性モデルに対して、このようなF/Tモデル変更からの計算を行うことは多大な時間を要するのが普通であり、現状の計算機性能条件の下で数分以内の計算時間という条件を満たすには何らかの工夫が必要になる。

計算時間を短縮化する方策として、カットセットベースの計算手法がある。これは、全ての系統が運用状態にあるとした条件下で導出したシーケンスミニマルカットセットに対して、アウテージ中の系統に含まれるイベントを選び出して Ω を代入し、ブール代数演算処理により縮約・簡単化を実施することで新たなプラント状態（=系統運用構成）のミニマルカットセットを求め、リスク指標を計算する方法である。プラント状態が変化する度にフォールトツリーの構成を変更して対応するミニマルカットセットを求める方法に比較すると、ブール代数演算処理の量が減るために計算時間を短縮することができる。

この手法でベースとなるミニマルカットセットデータは、ブール代数処理コードによって計算機により導出される。しかし、実機プラントモデルのような大規模モデルのミニマルカットセット導出に際しては、計算コードが扱えるデータ処理容量からの制約とアウトプットであるミニマルカットセットデータに対する容量制限とから、発生確率に対する寄与の小さなミニマルカットセット項目に対して裾切り処理を行う必要がある。

一般に、このような裾切り処理の対象となる項は高次のミニマルカットセット項である。ところが、ある系統がアウテージ状態となればその系統は確率1で機能を喪失していることと等価であり、たとえ高次のミニマルカットセット項であっても発生確率に対する寄与が増大する場合がありえる。

例えば、あるカットセット項： $A * B * C$ の定量値（＝発生確率） Q は、イベントNの発生確率を $Pr(N)$ とすれば、 $Q = Pr(A) \times Pr(B) \times Pr(C)$ である。 Q が裾切り値より小さければ、 $A * B * C$ の項は削除されてしまう。ある系統がアウテージとなった時、系統の従属性から結果的にイベントA、Bを含む系統がアウテージ状態（運転停止中）となるのであれば、 $A = \Omega$ 、 $B = \Omega$ となり、 $Pr(A) = Pr(B) = 1$ となることから、この系統運用条件下でのカットセット項： $A * B * C$ の定量値（発生確率） Q' は、 $Q' = 1 \times Pr(C)$ であり、裾切り処理で削除されなかった他のカットセット項よりも値が大きくなり、ミニマルカットセット全体の発生確率への寄与が増大している可能性がある。また、この系統運用条件下でカットセット項： $A * B * C$ に $A = \Omega$ 、 $B = \Omega$ を代入すれば、1次のカットセット項： C が現れることになるから、 $C * X$ 、 $C * Y * Z$ 等のカットセット項があれば、ブール代数の吸収則によりカットセット項： C に吸収されミニマルカットセットの構造が変化することになる。ところが、カットセット項： $A * B * C$ が裾きり処理により削除されていれば、このような吸収則は適用されず、系統運用構成の変化に伴うカットセット構造の変化を正しく考慮することができない。

ミニマルカットセットをベースに計算する方法は、計算時間の短縮化を図ることができるというメリットがあるが、プラントの系統運用状態の変化に伴い、本来であれば寄与が増大する項やミニマルカットセット構造に影響を与える項が裾切り処理によって取り除かれている可能性がある。したがって、ある系統運用構成の下で導出されるリスク指標が十分な精度を保っているかどうかは、F/Tモデルからの再計算結果と比較してみなければわからないというデメリットがある。

2. ミニマルカットセットベース手法の改良

2. 1 手法改善のための着眼点

前章で述べたようなミニマルカットセットベース手法のデメリットに対処する方法としては、系統の運用状態の全ての組み合わせに対応したミニマルカットセットデータを予め用意しておくことが考えられる。ミニマルカットセットデータ導出の際に、適切な足切り値を設定することにより、対応する系統構成の下で信頼度上重要となるカットセット項が抜け落ちることを防ぐことができる。ただし、 n 個の系統がある場合には、 2^n 通りの組み合わせが可能であり、 $n > 10$ となる実機プラントモデルでは組み合わせの数は膨大となることが容易に予想できる。

しかし、リスク評価では評価対象とするシステムが運転可能状態にあること、すなわちシステムの成功基準が満たされているプラント状態であることを前提として、その機能喪失の確率を求めようとする。したがって、評価対象システムの稼働条件（=成功条件）を満たしている有限個の系統運用構成の各々に対応したミニマルカットセットデータを準備しておけば十分である。図2-1に例を示す。P、Q、Rの3つのシステムは、それぞれ、A、B、Cの3つの系統と従属関係にある。3つの系統A、B、Cの運用構成は、 $2^3=8$ 通りの組み合わせ（:No.1～8）がある。さて、システムPの運転が成功するためには3つの系統A、B、Cが全て稼働している必要があり、それ以外の系統構成ではシステムPは稼働しないので、そのような系統運用構成（No.2、3、～、8）の下ではシステムPのミニマルカットセットを考慮する必要はない。同様にして、システムQでは、No.1、2、3、4の4通り、システムRでは、No.1、2、3、4、5の5通りの系統運用構成の場合についてのみミニマルカットセットを求めておけば十分であり、8通りの系統運用構成全てに対してミニマルカットセットデータを求める必要はない。

2. 2 改良手法：MPS法の概要

「2. 1」で述べた考察を基にして、ミニマルカットセットベース手法を改良した新たな計算手法を考案した。リスク評価の対象システムを原子炉停止時の崩壊熱除去系とした場合を例として、以下、本手法の概要を説明する。

炉停止期間中には計画メンテナンス実施のためにアウテージとなっている系統が存在する。一方で崩壊熱を除去するため除熱ループを継続して運転する必要があり、プラントのサポート系統（電源、補機冷却水系、換気空調系等）の運用構成は除熱ループの運転が可能となる組み合わせでなくてはならない。サポート系統が多重トレイン構成（例えば、100%容量×2）であれば、その組み合わせは1通りではなく複数個存在することになり、少なくとも1つの組み合わせが成立していれば対象としている除熱ループの運転が可能となる。このような必要最小限のサポート系統の組み合わせ（サポート系統の集合）は、除熱ループの運転に成功するためのミニマルバスセット（以下MPS）をサポート系統単位で表現したものに相当する。

図2-1には、系統A、B、Cで表現したシステムP、Q、Rのそれぞれのミニマルバスセットが示されてい

る。「 $X * Y$ 」は積事象で「系統XとYの両方が稼働すること」を意味している。「 $X + Y$ 」は和事象であり「系統（または条件）XまたはYが稼働すること」を意味している。システムQ、Rはサポート系統に多重性があるため複数の組み合わせが可能であり複数の項で表現されている。

ミニマルカットセットを導出する際にフォールトツリーを用いるのと同様に、MPSはサクセスツリーから導出することができる。サクセスツリーは、頂上事象が成立するための条件を演繹的にたどってツリー構造にまとめたものである。除熱ループとサポート系統、及びサポート系統間の機能の従属性を考え、除熱ループの機能が成功するためのサクセスツリーや個々のサポート系統の機能が成功するためのサクセスツリーをサポート系統レベルで作成できる。これらのツリーのマージ（結合）、ブール代数演算により、サポート系統の組み合わせとして各々の除熱ループのMPSを求めることができる（具体例については、第3章で述べる）。

ある除熱ループ、例えばAループ強制循環除熱（以下、AFC）の運転に成功するためのMPSは、 $MPS = \sum MPS_i$ のようにブール代数式で表現される。各々の項 MPS_i は、AFCを稼働させるために運転されなくてはならない必要最低限のサポート系統の組み合わせを表している。逆の見方をすれば、AFCが稼働するためには、これらの項 MPS_i により表現されるサポート系統運用構成の何れかに包絡される組み合わせでなければならない。再び、図2-1を例にして説明する。システムRが稼働に成功するための系統運用の組み合わせはNo.1～5までの5種類であるが、いずれの組み合わせもミニマルパスセットである $A*B+C$ の集合に包絡されていることがわかる。No.1、4、5の系統運用はミニマルパスセット項の組み合わせであり、No.2、3はそれぞれ、ブール代数表現 $B*C$ 、 $A*C$ であるからミニマルカットセット項のCに包含されている。したがって、AFCの稼働条件を満たす任意の系統運用構成は、 $\sum MPS_i$ 中のいづれかの項から構成される和集合（ $\sum MPS_j$ ：ただしアウテージ中の系統を含む MPS_j を除く）として表現されることになる。

ある系統運用構成： C_k の条件下でAFCのミニマルカットセットを求めるを考える。 C_k の条件下でAFCのMPSが $MPS(C_k) = \sum MPS_j$ と表現される時、AFCが成功するには、各々の項 MPS_j が表す系統運用条件の内、いづれか1つの条件下で成功となつていればよい。逆に、AFCが失敗するためには、各々の項 MPS_j が表す系統運用条件の全ての条件下で失敗となつてゐることが必要である。したがって、AFCのミニマルカットセットは、個々の MPS_j に対応する系統運用構成の下でのミニマルカットセット： mcs_j を掛け合わせた積事象（ $\prod mcs_j$ ）として表現できる。この積事象 $\prod mcs_j$ をブール代数処理により縮約／簡単化して整理すれば、これが系統構成： C_k の条件下でのAFCの mcs となる。各々の項 MPS_j に対応するプラント運用状態の下でのAFC失敗のミニマルカットセット： mcs_i は、F/Tモデル中で MPS_j に現われない系統に Ω を代入して導出すればよい。

以上、ミニマルパスセットを利用して系統構成の変化に対応したリスクを評価するという改良手法の概要を説明した。以下では、本改良手法をMPS法と呼ぶことにする。

2. 3 MPS法による処理手順

「2. 2」で説明したMPS法の具体的な計算ステップを図2-2にまとめた。複数の除熱ループからなる崩壊熱除去系で、成功基準は複数の除熱ループの内、いずれか1ループの運転に成功すればよいとした場合を例としている。この場合、崩壊熱除去系機能喪失のミニマルカットセットは、それぞれの除熱ループのミニマルカットセットを掛け合わせ（ブール代数積）を作り、縮約処理により簡単化することで導出できる。

最初にミニマルカットセットデータを「2. 2」で説明した方法で整備する。まず、各々の除熱ループ毎に系統単位のミニマルパスセットであるMPSを求める。次に、 $MPS = \sum MPS_i$ の各々の項 MPS_i に対応するプラント運用状態の下での除熱ループ失敗のミニマルカットセット： mcs_i を求める。「2. 2」で説明したようにFTモデル中で MPS_j に現われない系統に Ω を代入して導出する。

上で整備したカットセットデータを下にして、ある系統運用構成の条件の下で崩壊熱除去系の機能喪失確率を導出する。各除熱ループのMPSから、メンテナンス中の系統を含むパスセットを除外することにより、この系統運用構成を包含するMPS項を選定する。選択されたMPS項に対応するミニマルカットセットデータを集め、これらの掛け合わせ（ブール代数積）を作り、縮約処理により簡単化する。

F/Tモデルが実機プラントモデルのような大規模モデルであれば、 $MPS = \sum MPS_i$ の各々の項 MPS_i に対応する mcs_i の導出には適当な定量値データを用いて裾切り処理を行う必要がある。この時、適切な裾切り値の設定により対応する系統構成（= MPS_i ）の下で重要となるカットセット項の抜け落ちを防止することが重要である。特に、最終的に積事象（ $\prod mcs_i$ ）を作り、ブール代数法則に従って縮約／簡単化が行なわれる所以、複数の mcs_j に共通に含まれるようなイベントが裾切り処理によって削除されないように注意することが必要となる。

成功基準が、例えば、A,B,Cの3ループからなる崩壊熱除去系があり、A,B,Cの各ループが全て運転に成功しなければならないという場合も考えられる。このような場合、ミニマルパスセットは評価対象系統の成功基準に対して作成すればよいのだから、3ループとも運転に成功するとの条件の基にサクセスツリーを組み合わせてミニマルパスセット（MPS）を導出する。MPSは、 $MPS = \sum MPS_i$ のようにブール代数式で表現される。各々の項 MPS_i に対するミニマルカットセットは、「A,B,Cのループの内いづれか1つの除熱に失敗」を頂上事象とするF/Tモデルに、項 MPS_i に含まれない系統= Ω を代入してブール代数演算により求められる。以上の手順が図2-2中の「ミニマルカットセットデータの導出」の部分に相当する。

系統運用構成に対応した機能喪失確率の導出では、図2-2と同様、系統構成を包含するミニマルバスセットの項を同定し、対応するミニマルカットセットデータを選択してそれらの積事象を作り、定量値データと合わせて、ミニマルカットセット、機能喪失確率を導出すればよい。

システム	サクセスツリー	ミニマルパスセット
P		システムPの稼働には、サポート系統A,B,Cの全てが稼働していることが必要 $P = A * B * C$
Q		システムQの稼働には、サポート系統A,B,Cの内、いづれか2系統が稼働していることが必要 $Q = A * B + B * C + A * C$
R		システムRの稼働には、サポート系統Cか、またはサポート系統A,B2系統が必要 $R = A * B + C$

サポート系統A,B,Cの系運用とシステムP,Q,Rの稼働状態

(1: 稼働状態、0: 停止中)

No.	A	B	C	P	Q	R
1	1	1	1	1	1	1
2	0	1	1	0	1	1
3	1	0	1	0	1	1
4	1	1	0	0	1	1
5	0	0	1	0	0	1
6	0	1	0	0	0	0
7	1	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0

図2-1 特定システムの稼働条件とサポート系構成

ミニマルカットセットデータの導出

- (1) 除熱モード毎 (ex.Aループ強制循環除熱) にサポート系統レベルでサクセスツリーを作成
- (2) サクセスツリーからサポート系統単位で表現されたミニマルパスセットを導出
- (3) 各々のミニマルパスセットに相当する運用条件の下でのミニマルカットセットを除熱ループ／モード毎に導出



系統運用構成に対応した機能喪失確率の導出

1. 除熱ループ、サポート系統について、メンテナンス中の系統を同定
2. 各除熱モード毎に、評価対象とする系統運用を包含するミニマルパスセットの組み合わせを選定
(メンテナンス中の系統を含むパスセットを除外していく)
3. 選定されたミニマルパスセットに対応するミニマルカットセットの同定
4. 全てのミニマルカットセットの積をブール代数演算により簡略化し、定量値データを合わせて最終的なミニマルカットセット、機能喪失確率を導出

図2-2 改良手法：MPS法による計算手順

3. 高速炉モデルプラントへの適用

これまでに述べてきたMPS法を、高速炉モデルプラントの停止時の崩壊熱除去系信頼性評価に適用し、従来のF/T手法と比較を行った。モデルプラントの崩壊熱除去系は、A、B、C の3ループとメンテナンス冷却系の計 4 つのループから構成されるものとする。このうち、A、B、C の3ループは、強制循環、自然循環の両除熱モードが可能であるが、メンテナンス冷却系は強制循環モードのみ可能であるとする。

3. 1 ミニマルパスセットの導出

崩壊熱除去ループ／運転モードの各々に対して、その運転に必要な最小のサポート系統の組み合わせを表現しているミニマルパスセットを導出した。

図3-1に示すようなプラントの系統従属関係を基にして、Appendix A に示すようにサクセスパスツリーを各サポート系統毎に作成した。Appendix A はツリー構造をブール代数の論理式で表現している。電源系については、非常用A,B,C系統、常用D、E系統のように大きく分類した形で取り扱うが、特に非常用DGについては、A,B,C系統毎に区別している。換気空調系については常に稼働しているものと仮定した。ただし換気空調系のサポート系である空調用冷水設備と電源に関連した従属関係を考慮している。

これらのブール代数式の代入、縮約処理により、崩壊熱除去ループ／運転モードの各々に対して、その運転に必要な最小のサポート系統の組み合わせであるミニマルパスセット（MPS）を導出した。各々の崩壊熱除熱モード毎のMPSをAppendix B に示す。

MPSの項数は以下の通りである。

	強制循環除熱モード	自然循環モード
Aループ	30項	6項
Bループ	80項	6項
Cループ	28項	8項
メンテナンス冷却系	72項	—
合計	210項	20項

3. 2 ミニマルカットセットデータの導出

「3. 1」で導出された除熱ループ/除熱モード別のMPSの全ての項に対して、当該ループ除熱失敗のミニマルカットセットデータをフォールトツリーモデルより求めた。フォールトツリーモデルは、マクロイ

ベント（複数イベントの和事象として表現され、かつ全てのフォールトツリーの中で独立となっている部分を1つのイベントとしてまとめたもの）を含んでいる形のものを利用した。本適用計算で使用したフォールトツリーモデルの規模（ゲート数、イベント数）は以下の表の通りである。

フォールトツリーネーム	ゲート数	イベント数
Aループ強制循環	465	963
Aループ自然循環	218	426
Bループ強制循環	668	1323
Bループ自然循環	217	426
Cループ強制循環	642	1281
Cループ自然循環	387	781
メンテナンス冷却系	455	914

MPSの各項に対応するミニマルカットセット導出時の条件としては、使命時間720時間、猶予時間ゼロ、裾切り値は1E-12とした。導出されたカットセットデータファイルの容量は、以下のようなようになった。

	強制循環除熱モード	自然循環モード
Aループ	543 KB	48 KB
Bループ	2474 KB	47 KB
Cループ	424 KB	84 KB
メンテナンス冷却系	3041 KB	—
合計	6482 KB	179 KB

カットセットデータの総数は210個となり、データ容量は約6.6MBとなった。

3. 3 崩壊熱除去機能喪失確率の評価

表3-1に示すような停止時のメンテナンス計画を仮定し、系統運用構成の変化に対応して期間を複数のフェイズに分割し、図2-2に示す手順に従って各フェイズ毎に崩壊熱除去系の機能喪失確率を評価した。計算には、SUN ワークステーション Sparc Station20を使用し、ブール代数処理コードとしてはbexpコードを利用した。このブール代数演算処理コードは、処理時間の高速化、データ処理容量の増大を目的として、

動燃事業団リスク評価技術開発室にて開発されたものである。

予め導出されたミニマルカットセットデータより必要なものを選択し、当該フェイズのイベント定量値データと合わせて崩壊熱除去機能喪失確率を求めた。計算結果を表3-2に示す。MPS法で得られた値は、フルトツリー手法により導出した機能喪失確率と良く一致している。

計算時間は掛け合わせに必要なミニマルカットセットデータの個数にほぼ比例する。掛け合わせに要する計算時間を各フェイズ毎に計測すると、約7秒から120秒となった。全てのフェイズ（11フェイズ）についての計算時間の合計は約5分であった。

表3-2から、MPS法での計算時間は、掛け合わせるミニマルカットセットデータの総数に依存していることがわかる。フェイズ8ではメンテナンス中のサポート系統数は0系統で、フェイズ9は1系統のみである。このようなアウテージ中のサポート系統数が少ないフェイズでは、系統運用構成に対応する（運用系統の組み合わせを包含する）ミニマルパスセット項目の数が増え、掛け合わせに必要となるミニマルカットセットデータ数も増加し、結果的にブール代数演算処理量に要する計算時間が増加している。

なお、以上の計算時間には、各フェイズ毎の定量値データ作成処理、及びフェイズの系統運用状態とMPSを比較して必要なカットセットデータを選択する処理に要する時間は含まれていない。前者の定量値データ作成処理は、同機種のワークステーションで各フェイズ当たり数十秒で実行できる。後者の処理についても、今後、計算機プログラムを作成し同機種のワークステーションで実行すれば、各フェイズ当たり数十秒以内の時間で済むものと思われる。

表3-1 系統運用とフェイズ分類

○：運転中

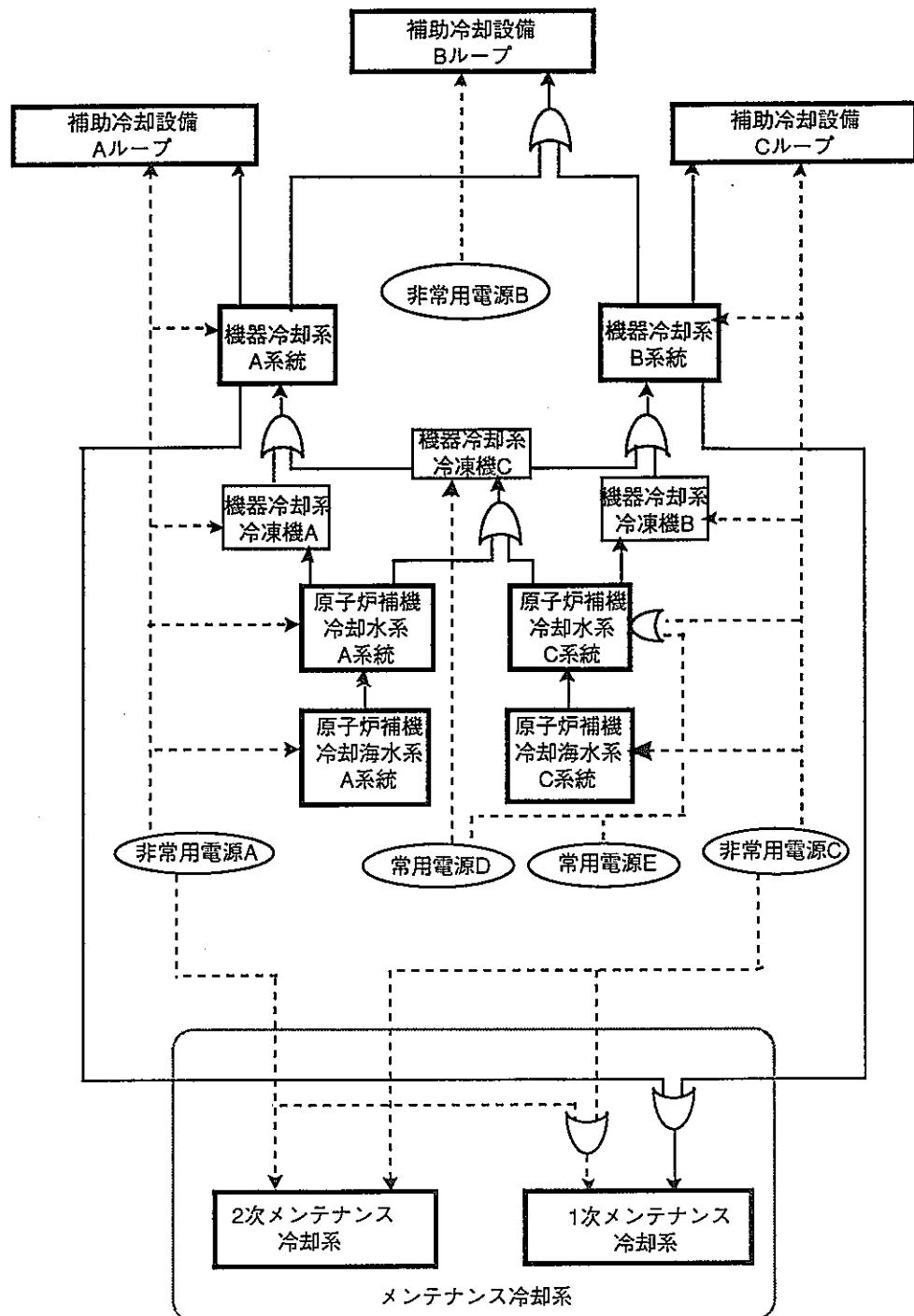
X : メンテナンス中

フェイズ	Aループ (1次系)	Aループ (2次系)	Bループ (1次系)	Bループ (2次系)	Cループ (1次系)	Cループ (2次系)	メンテナンス冷却系	補機冷却水系A	補機冷却水系B	補機冷却水系C	補機冷却海水系A	補機冷却海水系B	補機冷却海水系C	機器冷却系A	機器冷却系B	機器冷却系C	所内電源設備A	所内電源設備B	所内電源設備C	D-G A	D-G B	D-G C
1	○	○	○	○	○	○	○	X	○	○	X	○	○	○	○	○	○	○	○	X	○	X
2	X	X	○	○	○	○	○	X	○	○	X	○	○	○	○	○	○	○	○	X	○	X
3	X	X	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	X	○	X
4	X	X	○	○	○	○	○	○	○	X	○	○	X	○	○	○	○	○	○	X	○	X
5	X	X	○	○	X	X	○	○	○	X	○	○	X	○	○	○	○	○	○	X	○	X
6	○	○	○	○	X	X	○	○	○	X	○	○	X	○	○	○	○	○	○	X	○	X
7	○	○	○	○	X	X	○	○	○	○	○	○	X	○	○	○	○	○	○	○	○	○
8	○	○	○	○	X	X	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
9	○	○	X	X	X	X	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	X
10	○	○	X	X	X	X	○	○	X	○	○	X	○	○	○	○	○	X	○	○	X	○
11	○	○	○	○	○	○	○	○	○	X	○	○	X	○	○	○	○	○	○	○	X	○

表3-2 適用計算の結果とF/T手法との比較

停止時 フェイズ*	運用ループ*	機能喪失確率導出時 の据切り値（注）	改良手法：MPS法			F/T手法	
			掛け合わせたMCS総数	CPU TIME (秒)	機能喪失確率	CPU TIME (秒)	機能喪失確率
1	ABCM	1.0E-11	24	16	5.67E-07	258	5.67E-07
2	BCM	1.0E-11	20	15	1.56E-06	276	1.56E-06
3	BCM	1.0E-11	58	33	2.74E-10	200	2.74E-10
4	BCM	1.0E-11	14	6	1.54E-07	185	1.54E-07
5	BM	1.0E-11	11	5	2.95E-06	190	2.95E-06
6	ABM	1.0E-11	17	5	5.53E-08	180	5.53E-08
7	ABM	1.0E-11	38	14	1.10E-08	182	1.10E-08
8	ABM	1.0E-11	194	107	1.99E-09	198	1.99E-09
9	AM	1.0E-11	72	47	9.84E-07	196	9.84E-07
10	AM	1.0E-11	36	23	5.45E-06	196	5.45E-06
11	ABCM	1.0E-11	76	29	4.60E-09	194	4.60E-09
計			560	301 (5分)		2255 (38分)	

注：本テーブルに記載されている機能喪失確率を求める段階のブール代数処理で用いた据切り値であり、
ミニマルバスセットに対応したカットセットデータ導出時の据切り値（=1E-12）とは異なる



凡例 A → B : AはBのサポートシステム（冷却機能、その他）

E -----> B : EはBのサポートシステム（電源供給機能）

X Z : ZはXまたはYの機能が必要

図3-1 モデルプラント系統従属性 (1/2)

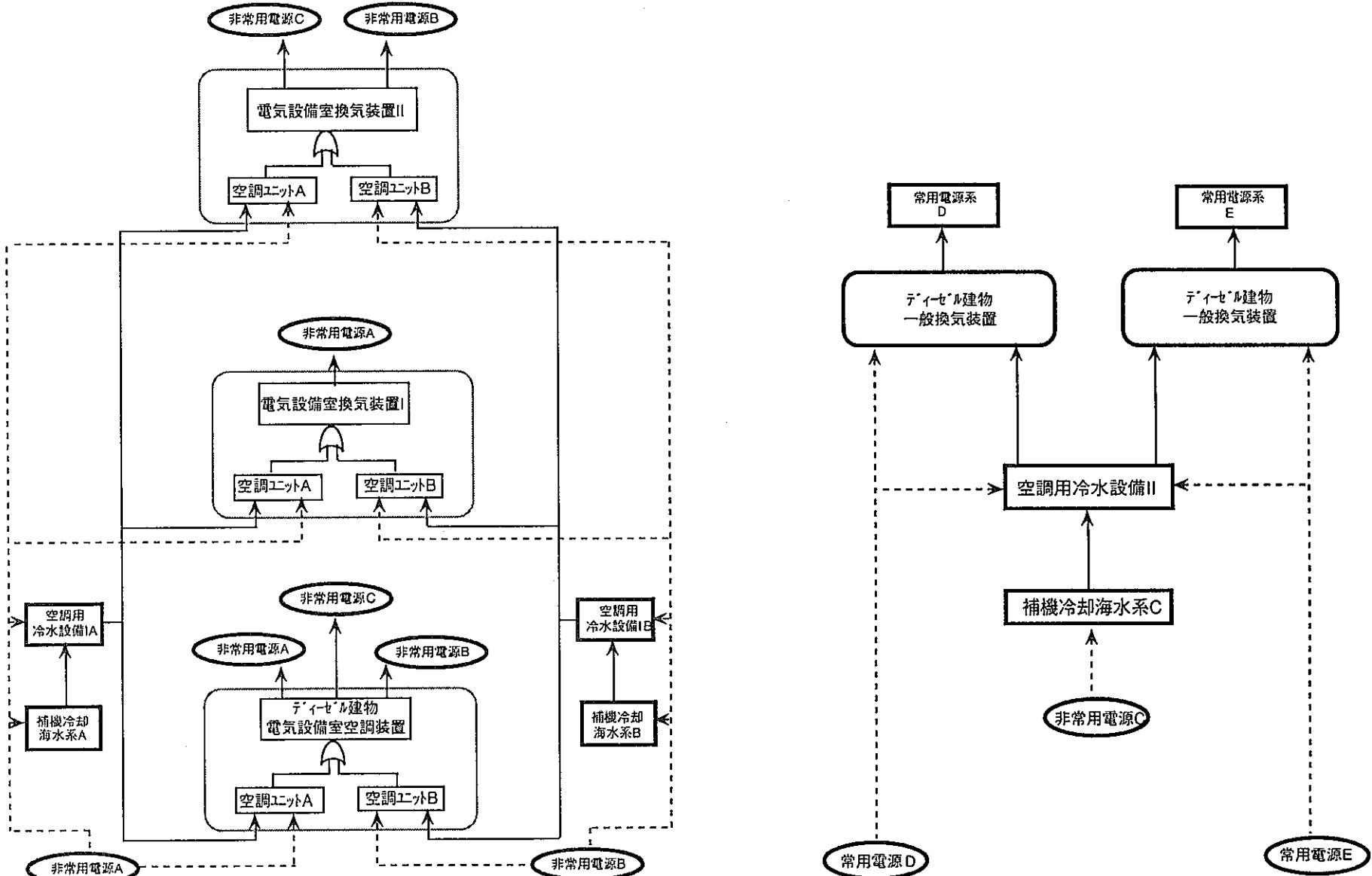


図3-2 モデルプラント系統従属性 (2/2)

4. 考察

第3章で説明した信頼性モデルに対して、従来の手法であるカットセットベース手法（以下、従来手法）を適用して同様な評価を行い、MPS法の結果と比較した。カットセットベース手法でも予め各々の除熱ループ／モード毎にミニマルカットセットデータを求めておき、系統運用構成に対応してこれらのミニマルカットセットにアウテージ系統に対応したイベントにΩを代入して、掛け合わせを行い、ブール代数的に縮約処理を行うという手順に従っている。

MPS法でも従来手法でも、最後のカットセットデータの掛け合わせの段階で裾切り処理を行っている。この時の裾切り値は、両手法とも、以下に示す全ての計算ケースについて1E-11とした。なお、両手法とも、この掛け合わせの段階での裾切り値と、予め各々の除熱ループ／モード毎にミニマルカットセットデータを導出する際の裾切り値は異なるものであることに注意していただきたい。以下の検討では、後者の方のミニマルカットセットデータ導出時の裾切り値のみを変化させて、結果（崩壊熱除去機能喪失確率）の精度へ与える影響を検討している。

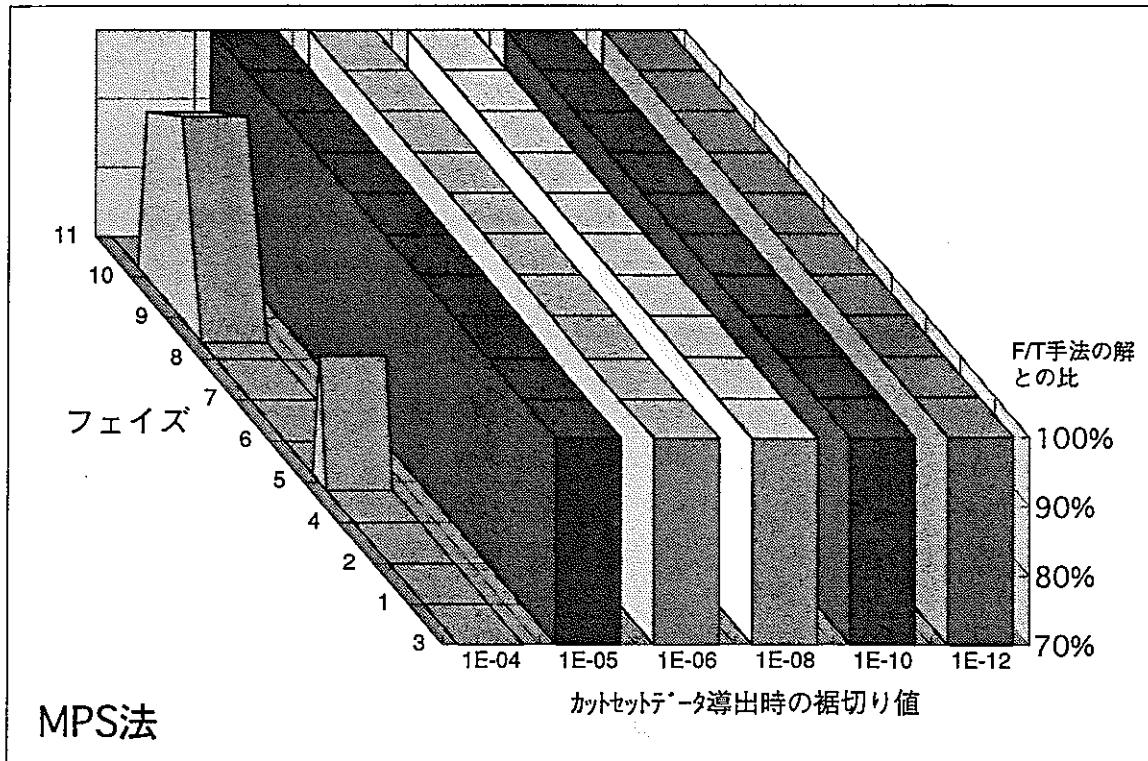
図4-1は、MPS法と従来手法のそれぞれの結果とフォールトツリー手法（F/T手法）による結果の比を、予め導出する除熱ループ／除熱モード毎のミニマルカットセットデータの裾切り値毎に整理したものである。この裾切り値を増加させるとミニマルカットセットデータ導出時に削除される項が増えたため、計算値の精度が悪化する可能性がある。図4-1の3次元グラフでは、わかりやすくするためにフェイズ3に対する結果手前側に移動してある。ミニマルカットセットデータの裾切り値を1E-12、1E-10とした場合は、どちらの手法もF/T手法と良く一致している。カットセットデータ導出時の裾切り値を1E-8とすると、従来手法ではフェイズ3の計算値がF/T手法の値の約80%となったが、MPS法では十分な精度を有している。カットセットデータ導出時の裾切り値をさらに増加して1E-6、1E-5とした場合でも同様な傾向となり、MPS法では十分な精度が保たれている。

図4-2は、ランダムな機器故障が発生してアウテージ系統が増大した場合を想定し、両手法により機能喪失確率を導出してF/T手法の評価結果と比較したものである。フェイズ4で所内電源設備Aが機能喪失した場合（CASE 1）、フェイズ8で所外電源機能喪失となった場合（CASE 2）、フェイズ9で所外電源機能喪失となった場合（CASE 3）の3ケースの結果をグラフの形で表現した。MPS法では、カットセットデータ導出時の裾切り値が1E-7以下であれば、全てのケースにおいてF/T手法と良く一致した。一方、従来手法では、裾切り値を1E-8としてもCASE 2とCASE 3とで精度が低下し過小評価となっている。カットセットデータ導出時の裾切り値を1E-6とすると、MPS法でもCASE 2で精度が大幅に低下している。この原因は、F/T手法の結果と比較したところ、裾切り値を1E-6として求めたMPS法のカットセットデータ中から共通要因故障イベントが取り除かれているためであることがわかった。

計算時間については、F/T法の結果と合わせて図4-3に整理した。カットセットデータ導出時の裾切り値については、図4-1、図4-2に示しているような感度解析の結果を基にして、より精度の良い結果が得られる場合でかつ最も計算時間の早いケースを選択することとし、MPS法では1E-7、従来手法では1E-10とした。MPS法の計算速度は従来手法と同程度であることがわかる。フェイズ8、9等では、メンテナンスによりアウテージとなる系統が少ないとMPS法で掛け合わせに必要なカットセットデータの数が増加するため、計算時間が従来手法よりも増加しているが、それでも1分以内に計算が終了している。全フェイズの計算時間については、MPS法が約3分、従来手法が約2分となり大きな差はない。

本研究の適用例では、従来手法であってもミニマルカットセット導出時の裾切り値を十分小さくしておけば精度の良い結果が得られることが示された。しかしながら従来手法では、ミニマルカットセットデータ導出時の裾切り値をどの程度まで小さくすれば十分であるのかが明確にはわからない。ミニマルカットセットデータの定量値に対して十分小さな裾切り値を設定したとしても、多様な系統運用構成について適用計算を数多く実行し、F/T手法の解と比較することにより十分な精度が保たれていることを確認する必要がある。

一方、MPS法でも、実機プラントモデルの様な大規模モデルに適用する場合には、カットセットデータをF/Tデータから導出する際に定量化を行い裾切り値を設定する必要がある。この時、裾切り処理を受ける部分の値がカットセットの定量値に対して十分に小さくなるように設定すれば、特定の系統運用構成の下で重要となるイベントが除かれてしまうことはない。図4-2の結果からわかるように、複数のカットセットデータに共通に含まれるイベントが取り除かれてしまうことがないようにすることが重要である。以上の点を考慮してMPS法を適用することにより、ミニマルバスセットを導出する段階で単位としたサポート系統のあらゆる組み合わせに対して精度のよい解を得ることが可能となる。ランダムな故障機器等に起因してより多くの系統がアウテージとなるような状態に対しても、評価結果の信頼性の観点からは、従来手法に比較してMPS法の方が優れていると考えられる。



MPS法

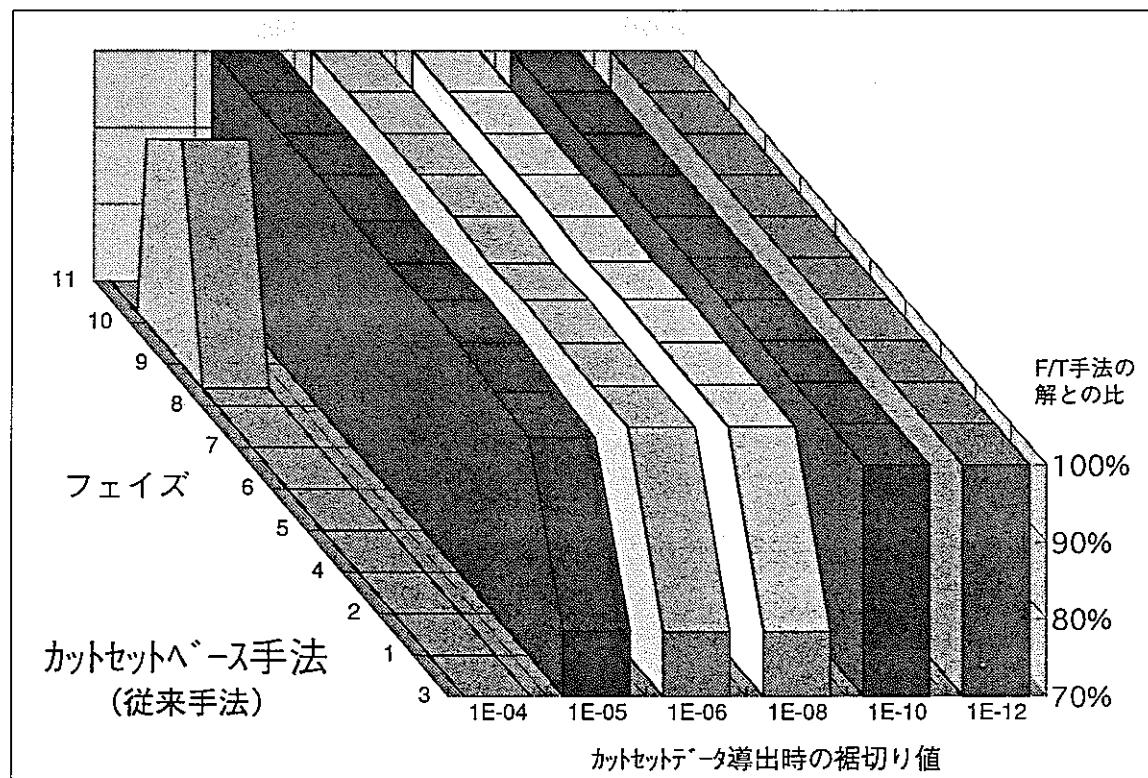


図4-1 従来カットセットベース手法との比較

— F/T手法解との比とカットセットデータ導出時の据切り値

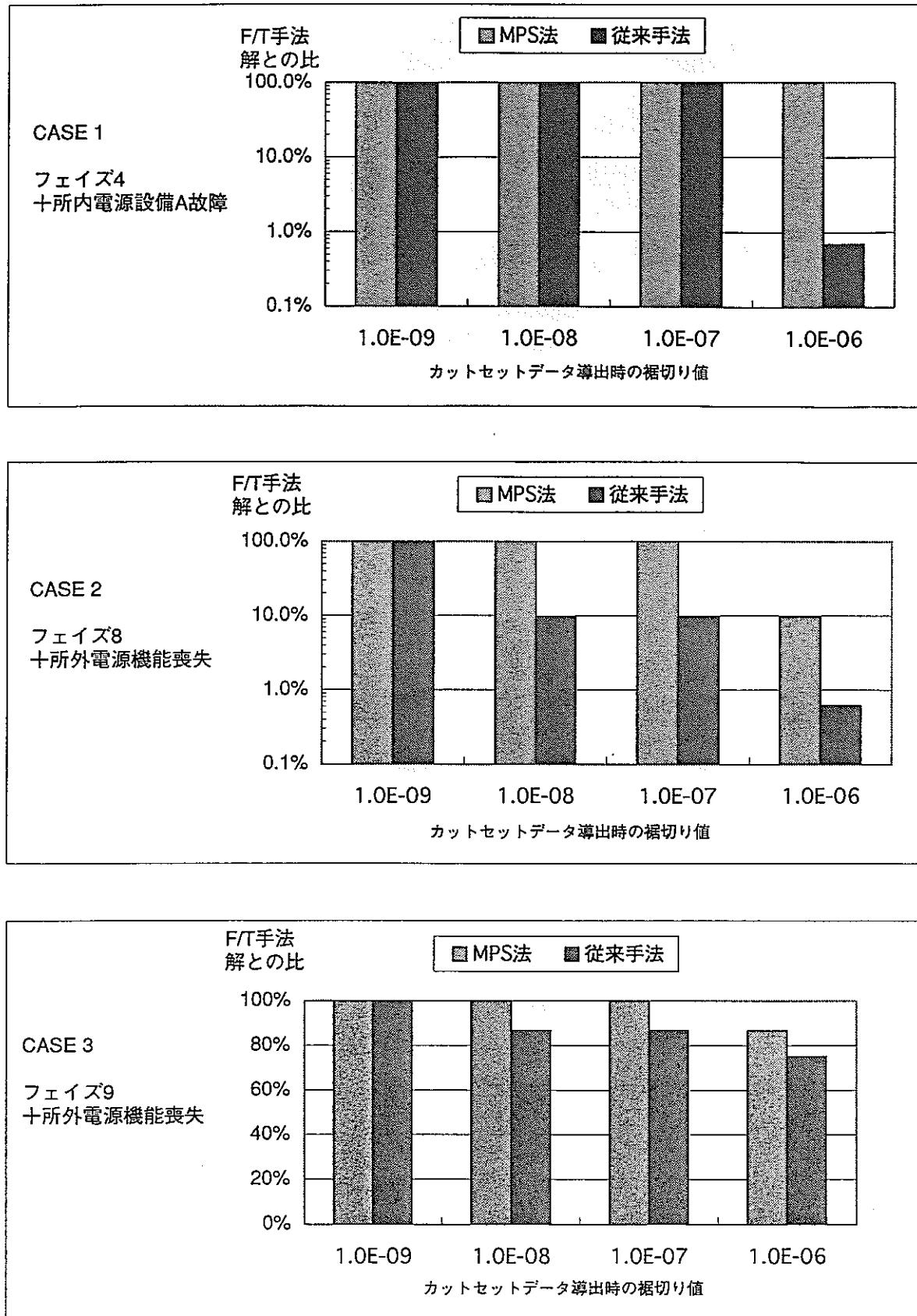
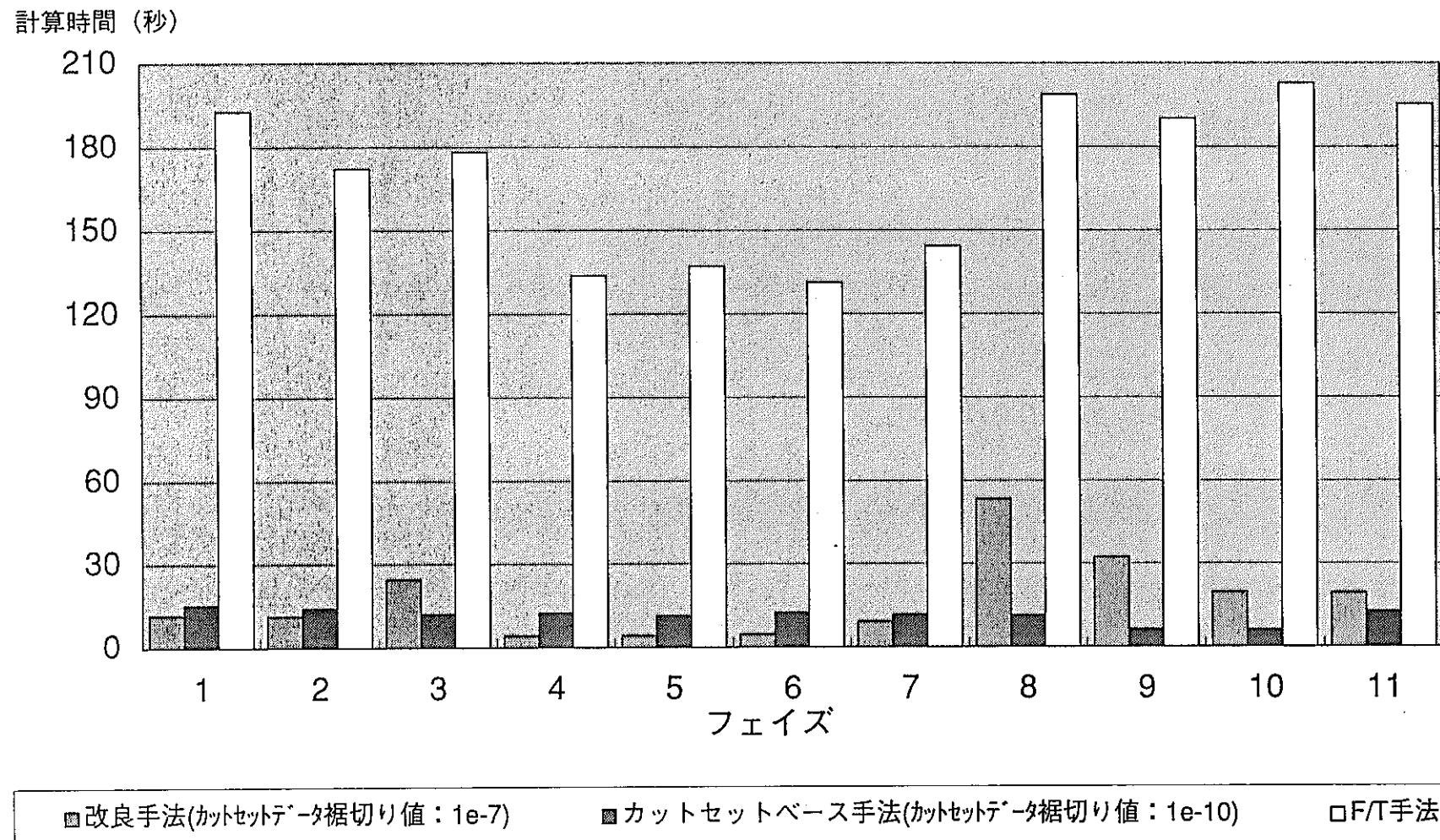


図4-2 ランダム機器故障発生時の評価



計算には、SUN Sparc Station20 を利用

ミニマルパスセットの選択に要する時間は含まれていない。

図4-3 計算時間の比較

5. 結論

リビングPSAにおいて、機器故障や系統の計画メンテナンスアウテージ等に伴う系統運用構成の変化に対応したリスクレベルの変動を迅速に評価することを目的として、従来のミニマルカットセットベース手法の欠点を改良したMPS法を開発した。

MPS法の特徴は、プラントの系統運用構成が、評価対象とするシステムのミニマルパスセットに含まれることに着目し、各々のミニマルパスセット項に対応するミニマルカットセットのみを予め導出しておくことで、特定の系統構成の下で重要となるカットセット項の抜け落ちがないようにしている点にある。

このMPS法を高速炉モデルプラントの停止時崩壊熱除去系信頼度評価に適用し、F/T手法の解と比較することにより手法の妥当性を確認するとともに、F/T手法に比較して計算時間が大幅に改善される見通しを得ることができた。さらに、従来のミニマルカットセットベース手法と比較を行い、計画メンテナンスアウテージに加えてランダムな機器故障を想定した場合の系統運用構成では、評価結果の信頼性の観点からはMPS法の方が優れており、MPS法はリビングPSAの計算手法としてより有効な手法であることを確認した。

謝辞

本研究の実施に当たり、株式会社マイテック杉野哲氏には各種の計算解析作業、データ整理作業を支援していただきました。また、リスク評価室信頼性グループの室員の皆様からは有益なコメントを頂くことができました。以上の方々に深く感謝いたします。

6. 参考文献

- [1] R. Nakai, "A Living PSA System LIPSAS for an LMFBR", PSA'91, (1991)
- [2] R. Nakai, "Application of a Living PSA System to LMFBR", 3rd TUV-Workshop, (1992)
- [3] K. Hioli, "Development of Level-1 PSA Tools at PNC", 2nd Japan-Korea PSA Workshop, (1993)

Appendix A

高速炉モデルプラント崩壊熱除去系のサポート系統単位のサクセスバスツリー

以下の論理式は、系統毎のサクセスツリーを論理式の形で表現したものである。

凡例：

AF : Aループ 強制循環のサポートシステム

BF : Bループ強制循環 のサポートシステム

CF : Bループ 強制循環のサポートシステム

M : メンテナンス冷却系のサポートシステム

AN : Aループ 自然循環のサポートシステム

BN : Bループ 自然循環 のサポートシステム

CN : Bループ自然循環のサポートシステム

CA : 機器冷却系A

CB : 機器冷却系B

CA1 : 機器冷却系 冷凍機A

CB1 : 機器冷却系 冷凍機B

CC : 機器冷却系 冷凍機C

CWA : 補機冷却水系A

CWC : 補機冷却水系C

CSA : 補機冷却海水系

CSB : 補機冷却海水系B

CSC : 補機冷却海水系C

EA : 非常用電源系A

EB : 非常用電源系B

EC : 非常用電源系C

EA1 : 所外電源供給ラン (\rightarrow EA)

EB1 : 所外電源供給ラン (\rightarrow EB)

EC1 : 所外電源供給ラン (\rightarrow EC)

ND : 常用電源系D

NE : 常用電源系E

OP : 所外電源

DGA : 非常用DGA

DGA : 非常用DGB

DGA : 非常用DGC

CH1A : 空調用冷水設備IA

CH1B : 空調用冷水設備IB

CH2 : 空調用冷水設備I

* ○○○○Mは、○○○○の系統のサクセスツリーに対して必要なサポート系統を結合したマージ化
サクセスツリーを意味する。

AF=CAM * EAM.

BF=(CAM + CBM) * EBM.

CF=CBM * ECM.

M=(CAM + CBM) * (ECM + EAM) * EAM * ECM.

AN= EAM.

BN= EBM.

CN= ECM.

CAM = CA * EAM * (CA1* CWAM + CCM).

CBM = CB * ECM * (CB1* CWCM + CCM).

CCM = CC * NDM * (CWCM + CWAM).

CWAM = CWA * CSAM * EAM .

CWCM = CWC * CSCM * (ECM + (NDM*NEM)) .

CSAM = CSA * EAM .

CSBM = CSB * EBM .

CSCM = CSC * ECM .

EAM = EA * (EA1 * OP + DGA * CSA) * (CH1AM + CH1BM) .

EBM = EB * (EB1 * OP + DGB * CSB) * (CH1AM + CH1BM) .

ECM = EC * (EC1 * OP + DGC * CSC) * (CH1AM + CH1BM) .

NDM = ND * OP * CH2 * NE * CSCM .

NEM = NE * OP * CH2 * ND * CSCM .

CH1AM = CH1A * CSAM .

CH1BM = CH1B * CSBM .

Appendix B

高速炉モデルプラントの崩壊熱除去系のミニマルバスセット（サポート系統単位による表現）

Aループ強制循環

AF =

```

EA*CSA*DGA*CH1A*CWA*CA*CA1+
EA*CSA*CH1A*EA1*OP*CWA*CA*CA1+
EA*CSA*DGA*CSB*EB*CH1B*DGB*CWA*CA*CA1+
EA*CSA*EA1*OP*CSB*EB*CH1B*DGB*CWA*CA*CA1+
EA*CSA*EA1*OP*CSB*EB*CH1B*EB1*CWA*CA*CA1+
EA*CSA*DGA*OP*CSB*EB*CH1B*EB1*CWA*CA*CA1+
EA*CSA*DGA*CH1A*OP*CWA*EC*DGC*CSC*ND*CH2*CC*CA+
EA*CSA*DGA*CH1A*OP*EC*DGC*CSC*ND*CH2*CWC*CC*CA+
EA*CSA*DGA*CH1A*OP*EC1*EC1*CSC*ND*CH2*CC*CA+
EA*CSA*DGA*CH1A*OP*EC1*CSC*ND*CH2*CWC*CC*CA+
EA*CSA*CH1A*EA1*OP*CWA*EC1*EC1*CSC*ND*CH2*CC*CA+
EA*CSA*CH1A*EA1*OP*EC1*CSC*ND*CH2*CWC*CC*CA+
EA*CSA*CH1A*EA1*OP*CWA*EC*DGC*CSC*ND*CH2*CC*CA+
EA*CSA*CH1A*EA1*OP*EC*DGC*CSC*ND*CH2*CWC*CC*CA+
EA*CSA*CH1A*EA1*OP*CSB*EB*CH1B*DGB*EC*DGC*CSC*ND*CH2*CWC*CC*CA+
EA*CSA*CH1A*EA1*OP*CSB*EB*CH1B*DGB*EC1*EC1*CSC*ND*CH2*CWC*CC*CA+
EA*CSA*CH1A*EA1*OP*CSB*EB*CH1B*EB1*EC1*EC1*CSC*ND*CH2*CWC*CC*CA+
EA*CSA*CH1A*EA1*OP*CSB*EB*CH1B*EB1*EC*DGC*CSC*ND*CH2*CWC*CC*CA+
EA*CSA*CH1A*EA1*OP*CSB*EB*CH1B*DGB*CWA*EC*DGC*CSC*ND*CH2*CC*CA+
EA*CSA*DGA*OP*CSB*EB*CH1B*DGB*EC*DGC*CSC*ND*CH2*CWC*CC*CA+
EA*CSA*DGA*OP*CSB*EB*CH1B*DGB*CWA*EC*DGC*CSC*ND*CH2*CC*CA+
EA*CSA*DGA*OP*CSB*EB*CH1B*DGB*CWA*EC1*EC1*CSC*ND*CH2*CC*CA+
EA*CSA*DGA*OP*CSB*EB*CH1B*EB1*EC1*EC1*CSC*ND*CH2*CWC*CC*CA+
EA*CSA*DGA*OP*CSB*EB*CH1B*EB1*EC*DGC*CSC*ND*CH2*CWC*CC*CA+
EA*CSA*DGA*OP*CSB*EB*CH1B*EB1*CWA*EC1*EC1*CSC*ND*CH2*CC*CA+
EA*CSA*DGA*OP*CSB*EB*CH1B*EB1*CWA*EC*DGC*CSC*ND*CH2*CC*CA.

```

Bループ強制循環

BF =

```

EA*CSA*DGA*EB*CSB*CH1B*DGB*CWA*CA*CA1+
EB*CSB*CH1B*DGB*EC*DGC*CSC*CWC*CB*CB1+
EA*CSA*DGA*CH1A*OP*EB*EB1*CWA*CA*CA1+
EA*CSA*CH1A*EA1*OP*EB*EB1*CWA*CA*CA1+
EA*CSA*DGA*CH1A*EB*CSB*DGB*CWA*CA*CA1+
EA*CSA*EA1*OP*EB*CSB*CH1B*DGB*CWA*CA*CA1+
OP*EB*CSB*CH1B*DGB*EC1*EC1*CSC*CWC*CB*CB1+
EA*CSA*EA1*OP*EB*CSB*CH1B*EB1*CWA*CA*CA1+
EA*CSA*DGA*OP*EB*CSB*CH1B*EB1*CWA*CA*CA1+
OP*EB*CSB*CH1B*EB1*EC1*EC1*CSC*CWC*CB*CB1+
OP*EB*CSB*CH1B*EB1*EC*DGC*CSC*CWC*CB*CB1+
EA*CSA*CH1A*EA1*OP*EB*CSB*DGB*CWA*CA*CA1+
OP*EB*CSB*CH1B*DGB*EC1*EC1*CSC*ND*CH2*CWC*CC*CB+

```


EA*CSA*DGA*CH1A*OP*EB*CSB*DGB*EC*EC1*CSC*ND*CH2*CWC*CC*CA+
EA*CSA*DGA*CH1A*OP*EB*CSB*DGB*CWA*EC*EC1*CSC*ND*CH2*CC*CB+
EA*CSA*DGA*CH1A*OP*EB*CSB*DGB*EC*EC1*CSC*ND*CH2*CWC*CC*CB+
EA*CSA*DGA*CH1A*OP*EB*CSB*DGB*CWA*EC*DGC*CSC*ND*CH2*CC*CB+
EA*CSA*DGA*CH1A*OP*EB*CSB*DGB*EC*DGC*CSC*ND*CH2*CWC*CC*CB+
EA*CSA*CH1A*EA1*OP*EB*CSB*DGB*CWA*EC*EC1*CSC*ND*CH2*CC*CA+
EA*CSA*CH1A*EA1*OP*EB*CSB*DGB*EC*EC1*CSC*ND*CH2*CWC*CC*CA+
EA*CSA*CH1A*EA1*OP*EB*CSB*DGB*CWA*EC*DGC*CSC*ND*CH2*CC*CA+
EA*CSA*CH1A*EA1*OP*EB*CSB*DGB*EC*DGC*CSC*ND*CH2*CWC*CC*CA+
EA*CSA*CH1A*EA1*OP*EB*CSB*DGB*CWA*EC*EC1*CSC*ND*CH2*CC*CB+
EA*CSA*CH1A*EA1*OP*EB*CSB*DGB*CWA*EC*EC1*CSC*ND*CH2*CC*CB+
EA*CSA*CH1A*EA1*OP*EB*CSB*DGB*EC*EC1*CSC*ND*CH2*CWC*CC*CB+
EA*CSA*CH1A*EA1*OP*EB*CSB*DGB*CWA*EC*DGC*CSC*ND*CH2*CC*CB+
EA*CSA*CH1A*EA1*OP*EB*CSB*DGB*EC*DGC*CSC*ND*CH2*CWC*CC*CB.

Cループ強制循環

CF =

EA*CSA*DGA*CH1A*EC*DGC*CSC*CWC*CB*CB1+
CSB*EB*CH1B*DGB*EC*DGC*CSC*CWC*CB*CB1+
EA*CSA*DGA*CH1A*OP*EC*EC1*CSC*CWC*CB*CB1+
OP*CSB*EB*CH1B*DGB*EC*EC1*CSC*CWC*CB*CB1+
EA*CSA*CH1A*EA1*OP*EC*EC1*CSC*CWC*CB*CB1+
OP*CSB*EB*CH1B*EB1*EC*EC1*CSC*CWC*CB*CB1+
EA*CSA*CH1A*EA1*OP*EC*DGC*CSC*CWC*CB*CB1+
OP*CSB*EB*CH1B*EB1*EC*DGC*CSC*CWC*CB*CB1+
EA*CSA*DGA*CH1A*OP*CWA*EC*EC1*CSC*ND*CH2*CC*CB+
EA*CSA*DGA*CH1A*OP*EC*EC1*CSC*ND*CH2*CWC*CC*CB+
OP*CSB*EB*CH1B*DGB*EC*EC1*CSC*ND*CH2*CWC*CC*CB+
EA*CSA*CH1A*EA1*OP*CWA*EC*EC1*CSC*ND*CH2*CC*CB+
EA*CSA*CH1A*EA1*OP*EC*EC1*CSC*ND*CH2*CWC*CC*CB+
OP*CSB*EB*CH1B*EB1*EC*EC1*CSC*ND*CH2*CWC*CC*CB+
EA*CSA*DGA*CH1A*OP*CWA*EC*DGC*CSC*ND*CH2*CC*CB+
EA*CSA*DGA*CH1A*OP*EC*DGC*CSC*ND*CH2*CWC*CC*CB+
OP*CSB*EB*CH1B*DGB*EC*DGC*CSC*ND*CH2*CWC*CC*CB+
EA*CSA*CH1A*EA1*OP*CWA*EC*DGC*CSC*ND*CH2*CC*CB+
EA*CSA*CH1A*EA1*OP*EC*DGC*CSC*ND*CH2*CWC*CC*CB+
OP*CSB*EB*CH1B*EB1*EC*DGC*CSC*ND*CH2*CWC*CC*CB+
EA*CSA*DGA*OP*CSB*EB*CH1B*DGB*CWA*EC*EC1*CSC*ND*CH2*CC*CB+
EA*CSA*EA1*OP*CSB*EB*CH1B*DGB*CWA*EC*EC1*CSC*ND*CH2*CC*CB+
EA*CSA*EA1*OP*CSB*EB*CH1B*EB1*CWA*EC*EC1*CSC*ND*CH2*CC*CB+
EA*CSA*DGA*OP*CSB*EB*CH1B*EB1*CWA*EC*EC1*CSC*ND*CH2*CC*CB+
EA*CSA*DGA*OP*CSB*EB*CH1B*DGB*CWA*EC*DGC*CSC*ND*CH2*CC*CB+
EA*CSA*EA1*OP*CSB*EB*CH1B*DGB*CWA*EC*DGC*CSC*ND*CH2*CC*CB+
EA*CSA*EA1*OP*CSB*EB*CH1B*EB1*CWA*EC*DGC*CSC*ND*CH2*CC*CB+
EA*CSA*DGA*OP*CSB*EB*CH1B*EB1*CWA*EC*DGC*CSC*ND*CH2*CC*CB.

メンテナンス冷却系強制循環

M =

EA*CSA*DGA*CH1A*OP*CWA*EC*EC1*CA*CA1+
EA*CSA*DGA*CH1A*CWA*EC*DGC*CSC*CA*CA1+
EA*CSA*DGA*CH1A*EC*DGC*CSC*CWC*CB*CB1+
EA*CSA*CH1A*EA1*OP*CWA*EC*EC1*CA*CA1+
EA*CSA*DGA*CH1A*OP*EC*EC1*CSC*CWC*CB*CB1+
EA*CSA*CH1A*EA1*OP*EC*EC1*CSC*CWC*CB*CB1+

EA*CSA*CH1A*EA1*OP*CWA*EC*DGC*CSC*CA*CA1+
 EA*CSA*CH1A*EA1*OP*EC*DGC*CSC*CWC*CB*CB1+
 EA*CSA*DGA*CH1A*OP*CWA*EC*EC1*CSC*ND*CH2*CC*CA+
 EA*CSA*DGA*CH1A*OP*EC*EC1*CSC*ND*CH2*CWC*CC*CA+
 EA*CSA*DGA*CH1A*OP*CWA*EC*EC1*CSC*ND*CH2*CC*CB+
 EA*CSA*DGA*CH1A*OP*EC*EC1*CSC*ND*CH2*CWC*CC*CB+
 EA*CSA*DGA*CH1A*OP*CWA*EC*DGC*CSC*ND*CH2*CC*CA+
 EA*CSA*DGA*CH1A*OP*EC*DGC*CSC*ND*CH2*CWC*CC*CA+
 EA*CSA*CH1A*EA1*OP*CWA*EC*EC1*CSC*ND*CH2*CC*CA+
 EA*CSA*CH1A*EA1*OP*EC*EC1*CSC*ND*CH2*CWC*CC*CA+
 EA*CSA*CH1A*EA1*OP*EC*EC1*CSC*ND*CH2*CWC*CC*CB+
 EA*CSA*CH1A*EA1*OP*CWA*EC*DGC*CSC*ND*CH2*CC*CA+
 EA*CSA*CH1A*EA1*OP*EC*DGC*CSC*ND*CH2*CWC*CC*CA+
 EA*CSA*CH1A*EA1*OP*EC*EC1*CSC*ND*CH2*CWC*CC*CB+
 EA*CSA*CH1A*EA1*OP*CWA*EC*DGC*CSC*ND*CH2*CC*CA+
 EA*CSA*CH1A*EA1*OP*EC*DGC*CSC*ND*CH2*CWC*CC*CA+
 EA*CSA*CH1A*EA1*OP*EC*EC1*CSC*ND*CH2*CWC*CC*CB+
 EA*CSA*CH1A*EA1*OP*CWA*EC*DGC*CSC*ND*CH2*CC*CA+
 EA*CSA*CH1A*EA1*OP*EC*DGC*CSC*ND*CH2*CWC*CC*CA+
 EA*CSA*CH1A*EA1*OP*EC*EC1*CSC*ND*CH2*CWC*CC*CB+
 EA*CSA*CH1A*EA1*OP*CSB*EB*CH1B*DGB*CWA*EC*EC1*CA*CA1+
 EA*EA1*OP*CSB*EB*CH1B*DGB*EC*EC1*CSC*CWC*CB*CB1+
 EA*EA1*OP*CSB*EB*CH1B*DGB*EC*DGC*CSC*CWC*CB*CB1+
 EA*CSA*EA1*OP*CSB*EB*CH1B*EB1*CWA*EC*EC1*CA*CA1+
 EA*EA1*OP*CSB*EB*CH1B*EB1*EC*EC1*CSC*CWC*CB*CB1+
 EA*EA1*OP*CSB*EB*CH1B*EB1*EC*DGC*CSC*CWC*CB*CB1+
 EA*CSA*DGA*OP*CSB*EB*CH1B*DGB*CWA*EC*EC1*CA*CA1+
 EA*CSA*DGA*CSB*EB*CH1B*DGB*CWA*EC*DGC*CSC*CA*CA1+
 EA*CSA*DGA*CSB*EB*CH1B*DGB*EC*DGC*CSC*CWC*CB*CB1+
 EA*CSA*DGA*OP*CSB*EB*CH1B*EB1*CWA*EC*EC1*CA*CA1+
 EA*CSA*EA1*OP*CSB*EB*CH1B*EB1*CWA*EC*DGC*CSC*CA*CA1+
 EA*CSA*DGA*OP*CSB*EB*CH1B*DGB*EC*EC1*CSC*CWC*CB*CB1+
 EA*CSA*DGA*OP*CSB*EB*CH1B*EB1*EC*EC1*CSC*CWC*CB*CB1+
 EA*CSA*DGA*OP*CSB*EB*CH1B*EB1*CWA*EC*DGC*CSC*CA*CA1+
 EA*CSA*DGA*OP*CSB*EB*CH1B*EB1*EC*DGC*CSC*CWC*CB*CB1+
 EA*EA1*OP*CSB*EB*CH1B*DGB*EC*EC1*CSC*ND*CH2*CWC*CC*CB+
 EA*EA1*OP*CSB*EB*CH1B*DGB*EC*EC1*CSC*ND*CH2*CWC*CC*CA+
 EA*EA1*OP*CSB*EB*CH1B*DGB*EC*DGC*CSC*ND*CH2*CWC*CC*CB+
 EA*EA1*OP*CSB*EB*CH1B*DGB*EC*DGC*CSC*ND*CH2*CWC*CC*CA+
 EA*EA1*OP*CSB*EB*CH1B*EB1*EC*EC1*CSC*ND*CH2*CWC*CC*CB+
 EA*EA1*OP*CSB*EB*CH1B*EB1*EC*DGC*CSC*ND*CH2*CWC*CC*CA+
 EA*CSA*EA1*OP*CSB*EB*CH1B*DGB*CWA*EC*EC1*CSC*ND*CH2*CC*CA+
 EA*CSA*EA1*OP*CSB*EB*CH1B*DGB*CWA*EC*EC1*CSC*ND*CH2*CC*CB+
 EA*CSA*EA1*OP*CSB*EB*CH1B*DGB*CWA*EC*DGC*CSC*ND*CH2*CC*CA+
 EA*CSA*EA1*OP*CSB*EB*CH1B*EB1*CWA*EC*EC1*CSC*ND*CH2*CC*CA+
 EA*CSA*EA1*OP*CSB*EB*CH1B*EB1*CWA*EC*DGC*CSC*ND*CH2*CC*CB+
 EA*CSA*DGA*OP*CSB*EB*CH1B*DGB*EC*EC1*CSC*ND*CH2*CWC*CC*CB+
 EA*CSA*DGA*OP*CSB*EB*CH1B*DGB*EC*EC1*CSC*ND*CH2*CWC*CC*CA+
 EA*CSA*DGA*OP*CSB*EB*CH1B*DGB*CWA*EC*EC1*CSC*ND*CH2*CC*CA+
 EA*CSA*DGA*OP*CSB*EB*CH1B*DGB*CWA*EC*EC1*CSC*ND*CH2*CC*CB+

EA*CSA*DGA*OP*CSB*EB*CH1B*DGB*EC*DGC*CSC*ND*CH2*CWC*CC*CB+
EA*CSA*DGA*OP*CSB*EB*CH1B*DGB*EC*DGC*CSC*ND*CH2*CWC*CC*CA+
EA*CSA*DGA*OP*CSB*EB*CH1B*DGB*CWA*EC*DGC*CSC*ND*CH2*CC*CA+
EA*CSA*DGA*OP*CSB*EB*CH1B*DGB*CWA*EC*DGC*CSC*ND*CH2*CC*CB+
EA*CSA*DGA*OP*CSB*EB*CH1B*EB1*EC*EC1*CSC*ND*CH2*CWC*CC*CB+
EA*CSA*DGA*OP*CSB*EB*CH1B*EB1*EC*EC1*CSC*ND*CH2*CWC*CC*CA+
EA*CSA*DGA*OP*CSB*EB*CH1B*EB1*CWA*EC*EC1*CSC*ND*CH2*CC*CA+
EA*CSA*DGA*OP*CSB*EB*CH1B*EB1*CWA*EC*DGC*CSC*ND*CH2*CC*CB+
EA*CSA*DGA*OP*CSB*EB*CH1B*EB1*EC*DGC*CSC*ND*CH2*CWC*CC*CB+
EA*CSA*DGA*OP*CSB*EB*CH1B*EB1*EC*DGC*CSC*ND*CH2*CWC*CC*CA+
EA*CSA*DGA*OP*CSB*EB*CH1B*EB1*CWA*EC*DGC*CSC*ND*CH2*CC*CA+
EA*CSA*DGA*OP*CSB*EB*CH1B*EB1*CWA*EC*DGC*CSC*ND*CH2*CC*CB.

Aループ自然循環

AN =

EA*DGA*CSA*CH1A+
EA*CSA*CH1A*EA1*OP+
EA*EA1*OP*CH1B*CSB*EB*DGB+
EA*EA1*OP*CH1B*CSB*EB*EB1+
EA*DGA*CSA*CH1B*CSB*EB*DGB+
EA*DGA*CSA*OP*CH1B*CSB*EB*EB1.

Bループ自然循環

BN =

EB*DGB*CSB*CH1B+
EB*CSB*CH1B*EB1*OP+
EB*EB1*OP*CH1A*CSA*EA*DGA+
EB*EB1*OP*CH1A*CSA*EA*EA1+
EB*DGB*CSB*CH1A*CSA*EA*DGA+
EB*DGB*CSB*OP*CH1A*CSA*EA*EA1.

Cループ自然循環

CN =

CSA*EA*DGA*CH1A*OP*EC*EC1+
OP*CSB*EB*CH1B*DGB*EC*EC1+
CSA*EA*CH1A*EA1*OP*EC*EC1+
OP*CSB*EB*CH1B*EB1*EC*EC1+
CSA*EA*DGA*CH1A*EC*DGC*CSC+
CSB*EB*CH1B*DGB*EC*DGC*CSC+
CSA*EA*CH1A*EA1*OP*EC*DGC*CSC+
OP*CSB*EB*CH1B*EB1*EC*DGC*CSC.