

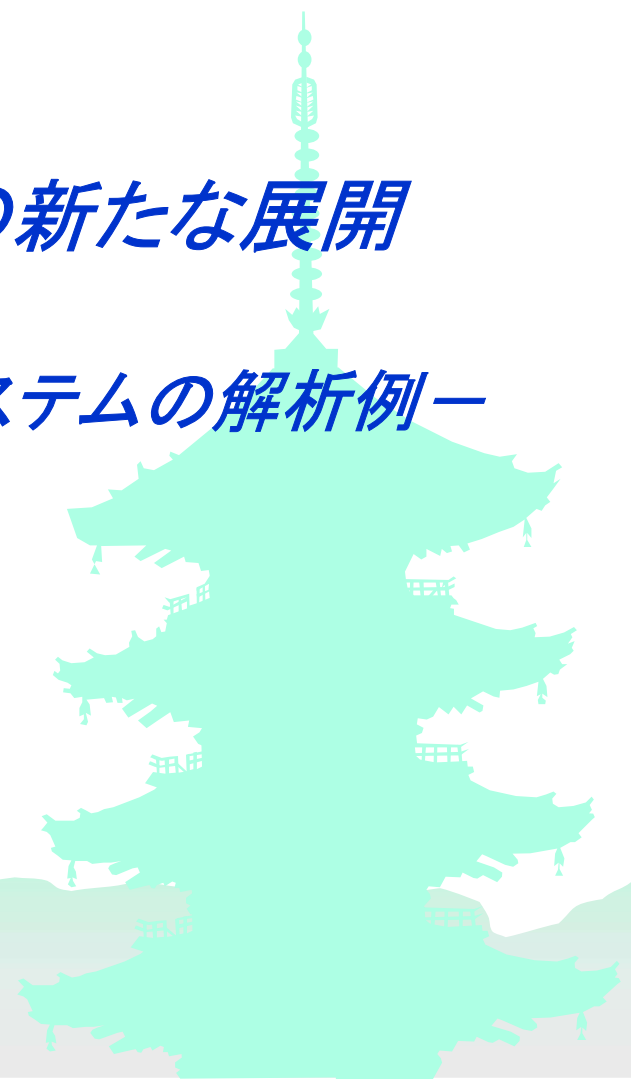
令和5年3月8日 第2回シンビオ研究談話会

システム信頼性解析手法 GO-FLOW の新たな展開

—ループ構造を考慮したフェイズドミッションシステムの解析例—

松岡 猛 (宇都宮大学)

mats@cc.utsunomiya-u.ac.jp



本講演の内容

本講演は最近公表した以下の論文内容に基づいています。

Reliability analysis of a BWR plant system at startup stage - analysis by the GO-FLOW methodology with consideration of loop structures and phased mission problem - ,

*Reliability Engineering & System Safety, Volume 233,
May 2023, 109086*

本講演の構成

1. はじめに
2. ループ構造の信頼性解析について
3. フェイズドミッション問題について
4. BWR原子力プラントの構成
5. 解析対象中のループ構造の解
6. GO-FLOW手法の紹介
7. GO-FLOWへのモデル化
8. 解析結果
9. 結論・まとめ
10. GO-FLOW解析の実演

はじめに

- ✧ 原子力発電所の起動動作では冷態停止状態から順次機器を立ち上げ、不安定な途中状態を経て安定的な定格出力状態へと至る。
- ✧ この様な状態変化の信頼性解析を実施して信頼度を確認しておくことは設計の妥当性、運転実施手順の妥当性確認にとって重要と考える。
- ✧ 起動時には典型的なフェイズドミッション問題とループ構造を持った運転状態が発生する。
- ✧ GO-FLOW手法を用いてこれら両要因を考慮した解析を実施する方法を示した。

ループ構造の信頼性解析(1)

- ◇ 信頼性解析やアベイラビリティ解析における論理的ループを解く問題は、長い間苦慮されてきた。
- ◇ 論理ループのサポートシステム間の依存関係が比較的弱い箇所で切断し、ループのない新しい論理を展開する試みが従来から多くなされている。
- ◇ Vaurioは論理ループを解消するための反復法を提案した。この方法では、ループ構造の再現性を反復計算で考慮するため、非常に直感的であるが一つの解の可能性を与えるだけである。

ループ構造の信頼性解析(2)

- ◇ ループ構造を持ったシステムの信頼性間の関係は次の式で表せられる。

$$x = A + B \cdot x$$

- ◇ ブール代数式であるため移項して解くわけにいかない。
- ◇ しかし、著者により一般的に以下の様に解けることが示された。

$$x = A + mB$$

- ◇ ここで、 m は任意ブール代数要素であり、これを定める方法が厳密解の解法として著者により示された。

ループ構造の信頼性解析(3)

- ◇ 論理的ループ構造を持たないこの解を、フォールトツリー(FT)や図形ベースの信頼性解析手法に利用することによりループシステムの解が求まる。
- ◇ しかしながら、その後も Dynamic Flowgraph Methodology (DFM)を用いる方法、ベイズ法を用いた closed-loop probabilistic reliability assessment (CPRA) methodが提案されている。大規模システムには適用できない、厳密解を用いず数値解を求める等の限界がある。
- ◇ 厳密解の方法を、簡便性, 直接性, 厳密性の観点から採用し, 図形ベースの信頼性解析手法の一つである GO-FLOW によってシステムのモデル化を行った。

フェイズドミッション問題(1)

- ◆ 技術の発展に伴い、多くのシステムが高度化・複雑化している。
- ◆ これらのシステムの多くは、原子力発電所や航空宇宙システムなど、フェーズド・ミッション・システム(PMS)と呼ばれ、異なるタスクを複数の連続した期間で実行するものとなっている。
- ◆ このような工学システム、特に安全や事故防止といった重要なミッションをサポートするために設計されたシステムにおいては、ミッションの信頼性を正確に求めることが極めて重要である。

フェイズドミッション問題(2)

- ◆ フェイズド・ミッション・システム (PMS) においては連続的にミッションが成功する必要がある。
- ◆ 各フェイズでの成功確率の積を取る必要がある。
- ◆ しかし、各フェイズで動作している機器・サブシステムに共通で使用されているものがあるとそれらの間の従属性を正しく考慮する必要がある。
- ◆ そのため、フェイズド・ミッション・システム (PMS) の解析が面倒となっている。

フェイズドミッション問題(3)

- ◆ Burdick et alは1977年に原子炉BWRに対する効果的な近似方法を提案し、その後多数の研究が実施され現在に至っている。
- ◆ 一般に、PMSの解析方法は、シミュレーションに基づく方法と解析的な方法の2種類に分類される。
 - ◆ シミュレーションの方法ではペトリネットを用いた研究もある。
- ◆ 解析的手法はさらに、(1) フォルトツリー(FT)、バイナリ決定図(BDD)などの組合せ手法、(2) マルコフプロセス、ベイズネットワーク(BN)などの状態空間モデルベース手法、(3) 前二者の組み合わせであるモジュール手法の三つのグループに分けることができる。

フェイズドミッション問題(4)

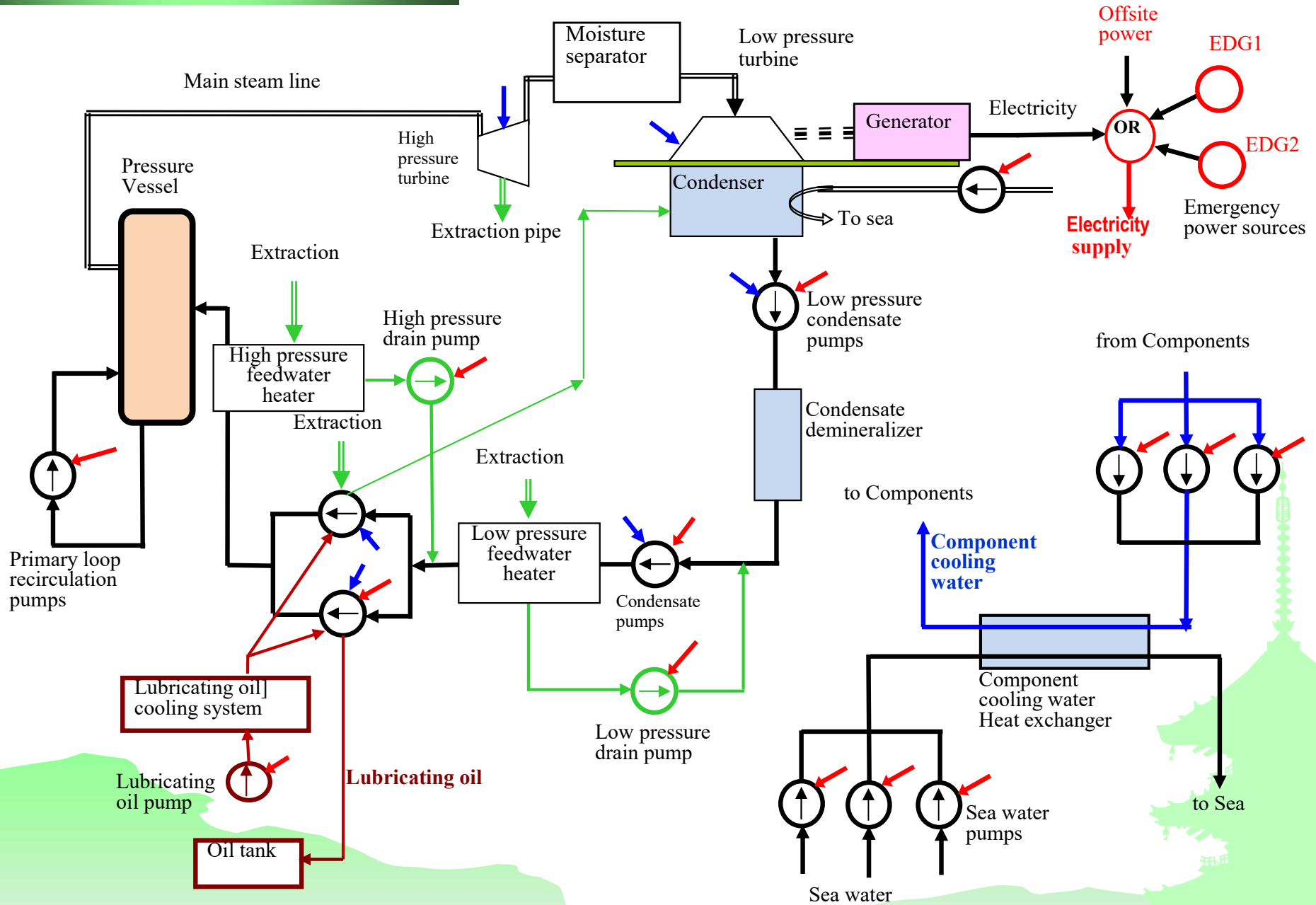
- ◆ フェイズド・ミッション・システム (PMS) においてシステムの各様相を考慮した解析が提案されてきている。
 - ◆ 複数状態機器
 - ◆ 非指数関数の保守可能機器
 - ◆ 共通原因故障
 - ◆ 故障の非完全な補償
 - ◆ 冗長性の分散
 - ◆ 異なったフェイズ間の複数状態機器の従属性
 - ◆ 外部からの衝撃の存在
 - ◆ 複数状態での k-out of-n サブシステムの考慮
 - ◆ ミッションのバックアップ設計
 - ◆ 相反フェイズの冗長性

フェイズドミッション問題(5)

- ◆ ループ構造を持つシステムを非解析的に解くと、各フェーズで反復計算や数値計算が必要になる。
- ◆ そのため、ループ構造を持つPMSの解析において、異なるフェーズ間の依存関係を扱うことが非常に困難となる。
- ◆ この理由により、ループ構造を持つPMSの信頼性解析の文献はほとんど見られない。

フェイズドミッション問題(6)

- ◆ 本研究では、ループ構造の論理を厳密解の助けを借りてGO-FLOWチャート上に直接モデル化した。
- ◆ また、BWR・PMSをGO-FLOW解析におけるPMSオペレータを用いて同じGO-FLOWチャート上にモデル化している。
- ◆ GO-FLOW手法は解析的な組合せ手法であり、解析の初期段階で独立した構成要素に対して数値計算を行う。
- ◆ このため、ループ構造を持つPMSの信頼性解析が容易かつ効率的に、高速に行える様になっている。



起動手順

Time (hour)	0	6	22	25	32	33	35	72	720	2160	4368	8760
Phase	0	1	2	3	4	5	6					
Off site power	Connected					Disconnect						
Main steam condensor	Vacuum established											
Control rods	Withdrawn (Criticality in 2 hours)											
Turbine				Starts (10% of full power)								
Generator					Provisional	Parallel with off site power						
Low- pressure condensate pumps			Starts									
High-pressure condensate pumps			Starts									
Electric main feed water pumps			Start					Stop				
Turbine driven main feedwater pumps					Start							
Related pumps				Start								
Sea water system				Starts								
Cooling system for main feedwater pumps				Starts								
Lubrication system				Starts								

設定した故障率データ(1)

- ◆ 日本原子力学会Level 1 PSA手順
- ◆ Component reliability data by the IAEA
 - ① Motor/Air operated valve
 - failure of open/close action $3.6 \times 10^{-3}/D$
 - failure during usage $2.0 \times 10^{-7}/\text{hour}$
 - failure during standby $2.0 \times 10^{-8}/\text{hour}$
 - (2) Pump
 - fails to start $2.7 \times 10^{-2}/D$
 - failure during operation $1.0 \times 10^{-6}/\text{hour}$
 - (3) Turbine
 - fails to start $2.7 \times 10^{-2}/D$
 - failure during operation $1.0 \times 10^{-6}/\text{hour}$

設定した故障率データ(2)

(4) Turbine generator

- fails to start $1 \times 10^{-4}/D$
- failure during operation $1.0 \times 10^{-6}/\text{hour}$

(5) Condensate water storage tank

- failure during operation $2.8 \times 10^{-8}/\text{hour}$

(6) Off site power

- failure during operation $1.0 \times 10^{-7}/\text{hour}$

解析対象中のループ構造の解

BWRプラント起動時においてループ構造が複数見られる。

- ◆ 主蒸気・電力系
- ◆ 機器冷却系
- ◆ 潤滑油系

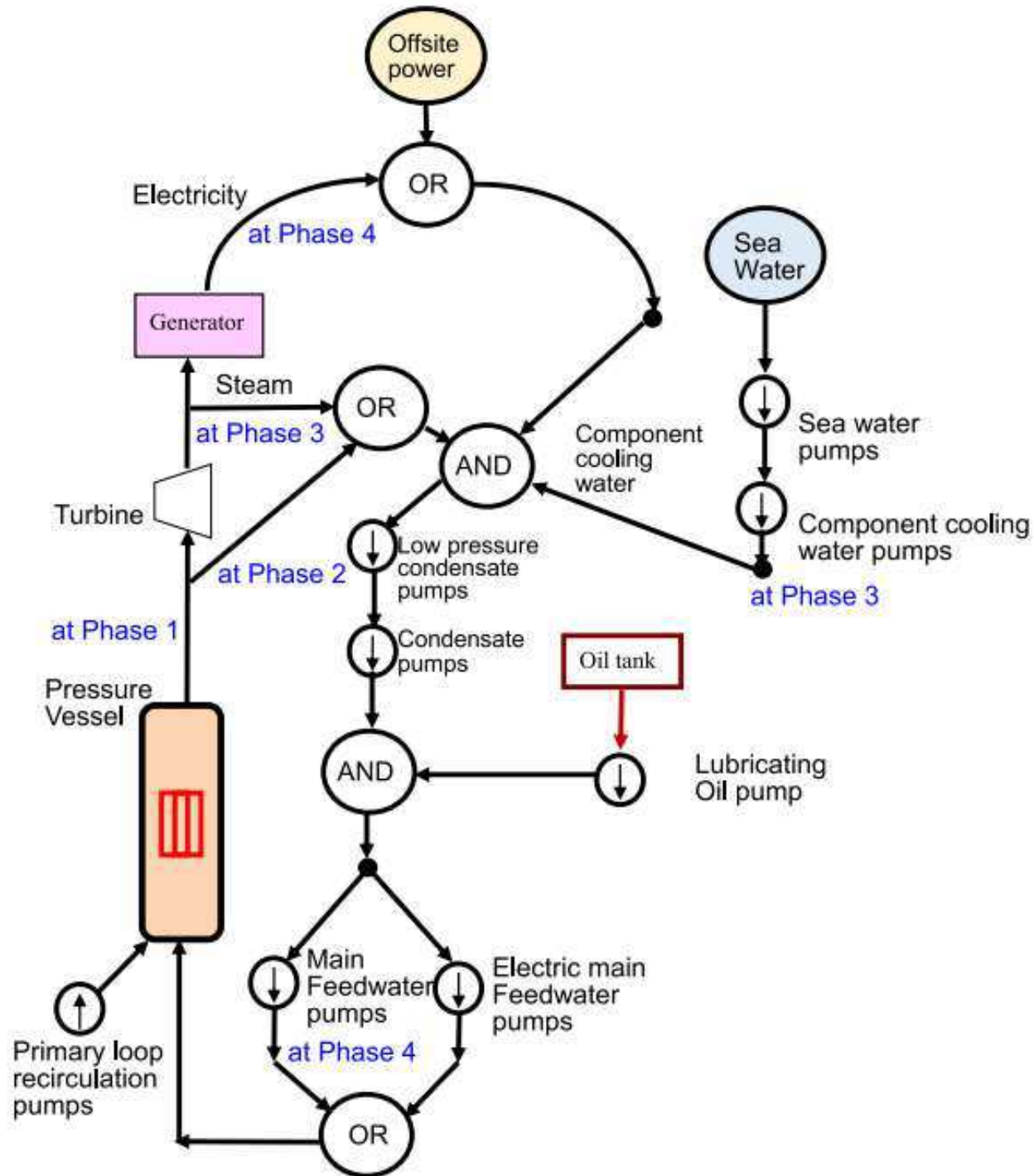


Fig. 2. Topological relation of a BWR plant system.



フェイズ1

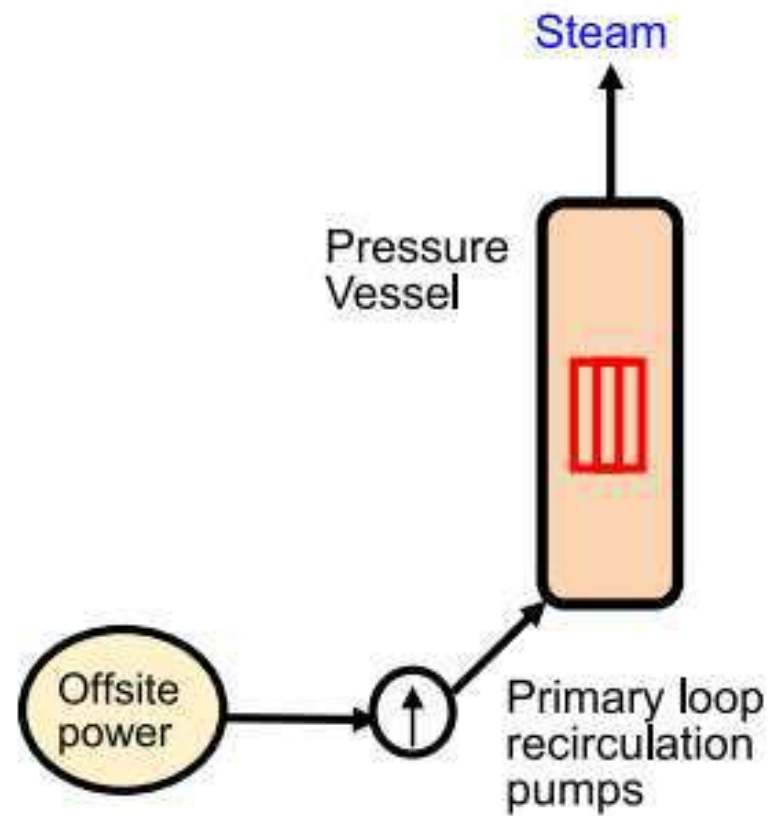


Fig. 3. Operating state at phase 1.

$$STM(t_1) = PRP(t_1) \cdot OSP(t_1)$$

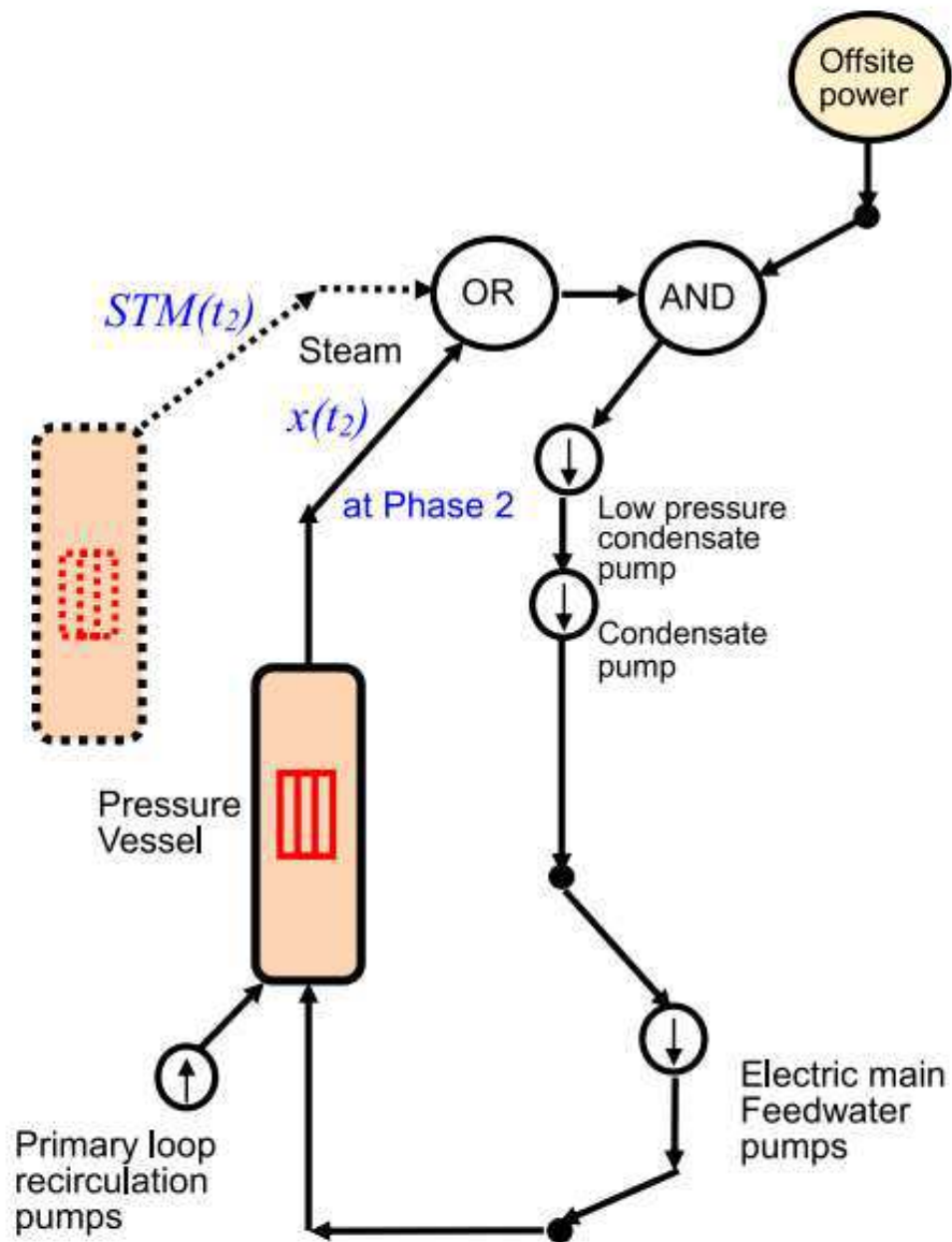


Fig. 4. Operating state at phase 2.

フェイズ2における解

$$x(t_2) = \{STM(t_2) + x(t_2)\} \cdot OSP(t_2) \cdot LCP(t_2) \cdot CP(t_2) \cdot EMFP(t_2) \cdot PRP(t_2)$$

$$\begin{aligned} x(t_2) &= STM(\tau_2) \cdot OSP(t_2) \cdot LCP(t_2) \cdot CP(t_2) \cdot EMFP(t_2) \cdot PRP(t_2) \\ &= OSP(t_2) \cdot LCP(t_2) \cdot CP(t_2) \cdot EMFP(t_2) \cdot PRP(t_2) \end{aligned}$$

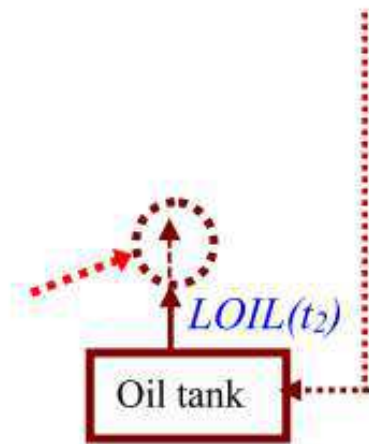


Fig. 6. Lubrication oil system before operation.

$$LOIL(t_2) = OT_{SS}(t_2)$$

$$x(t_3) = \{LOIL(t_3) + x(t_3)\} \cdot OSP(t_3) \cdot LOP(t_3) \cdot OCS(t_3) \cdot OT_T(t_3)$$

$$= \{OT_{SS}(t_3) + x(t_3)\} \cdot OSP(t_3) \cdot LOP(t_3) \cdot OCS(t_3) \cdot OT_T(t_3)$$

$$= OT_{SS}(\tau_3) \cdot OSP(t_3) \cdot LOP(t_3) \cdot OCS(t_3) \cdot OT_T(t_3) = OSP(t_3) \cdot LOP(t_3) \cdot OCS(t_3) \cdot OT(t_3)$$

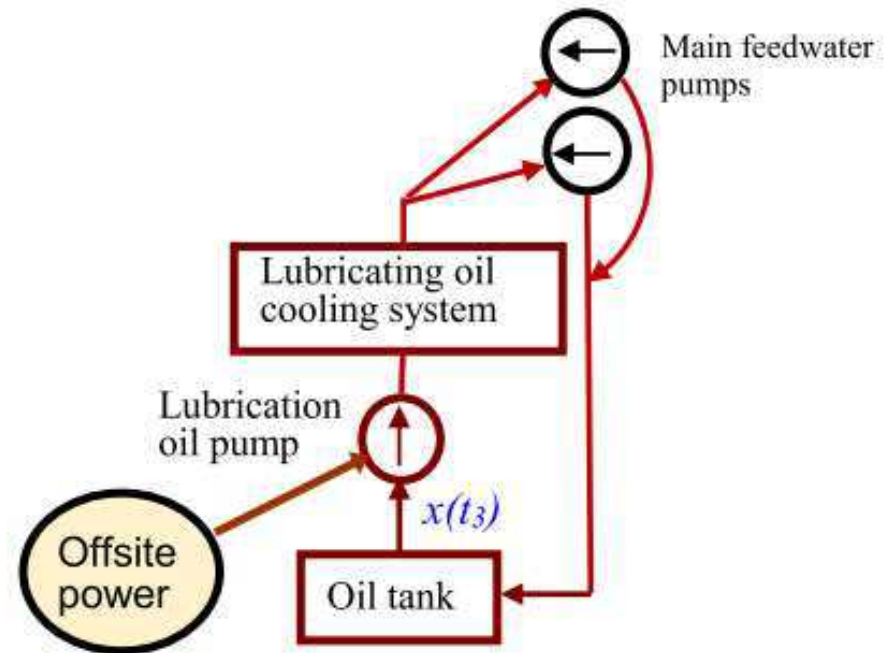


Fig. 5. Lubrication oil system.

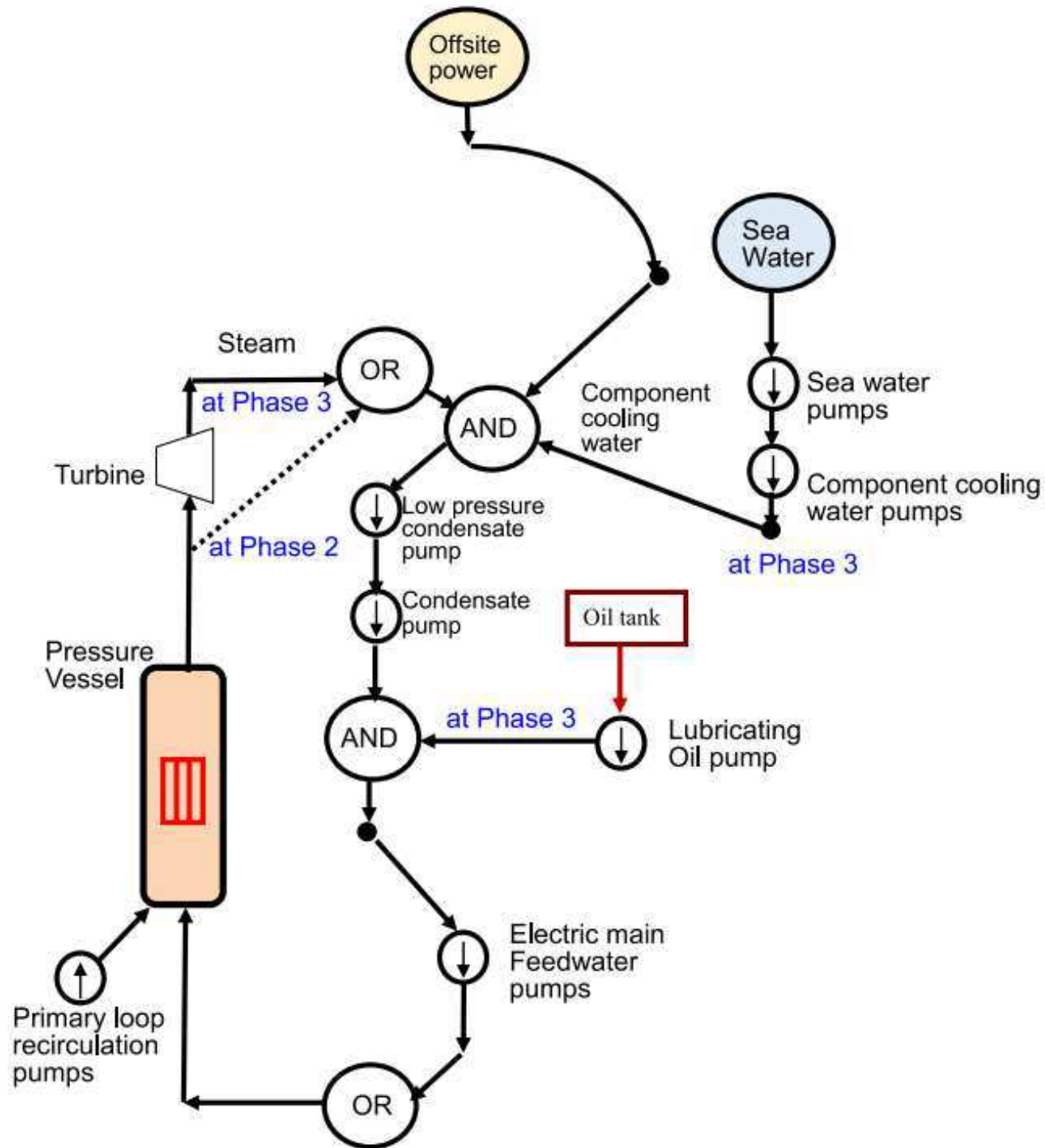


Fig. 7. Operating state at phase 3.

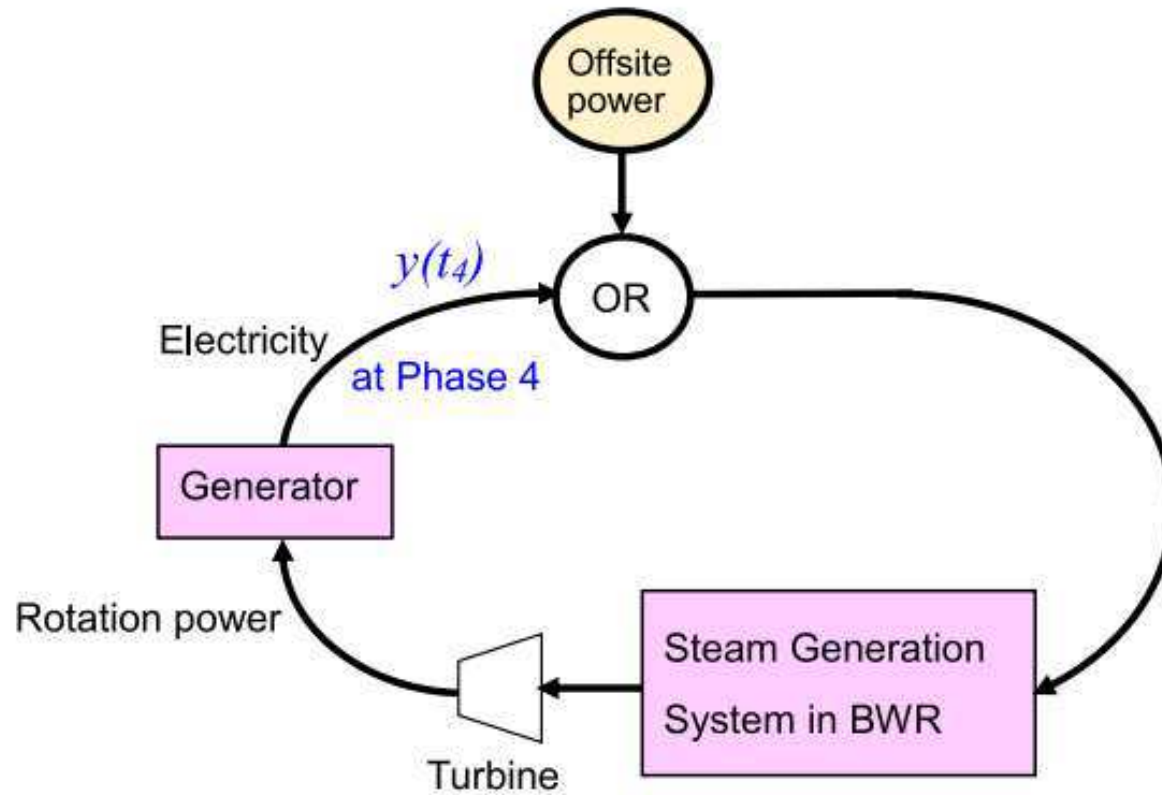


Fig. 8. Operating state at phase 4.

$$y(t_4) = \{OSP(t_4) + y(t_4)\} \cdot SGS(t_4) \cdot TRB(t_4) \cdot GEN(t_4)$$

$$y(t_4) = OSP(\tau_4) \cdot SGS(t_4) \cdot TRB(t_4) \cdot GEN(t_4)$$

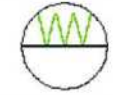
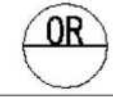
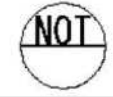

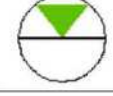
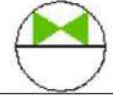
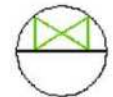
ループ構造の運転状態の成立過程

- ◆ 最初、SS-タイプ機器が存在する。
- ◆ SS-タイプ機器を起点として接続された一連の機器群が動作状態となる。
- ◆ ループ構造の接続が完了する。
 - ◆ 起点となったSS-タイプ機器がループ構造の外部にある場合
→ 接続時の影響が残る。 $OSP(\tau_4)$
 - ◆ 起点となったSS-タイプ機器がループ構造の内部にある場合
→ 痕跡は消える。

GO-FLOW手法の紹介

- 松岡によって開発された成功確率を追うシステム信頼性解析手法
- システムを構成する機器を標準のオペレータでモデル化
- 機器の接続関係を信号線により表現し、GO-FLOWチャートを作成する
- GO-FLOWチャートとシステムのフロー・ダイアグラムが対応。

Table 2. Operators of the GO-FLOW methodology

Type	Shape	Main inputs	Sub inputs	Output
Description				
21		$S(t)$	—	$R(t) = S(t) \cdot P_g$
Two state operator				
22		$S_1(t), S_2(t)$ $\dots S_n(t)$	—	$R(t) = 1.0 - \prod_{i=1}^n [1.0 - S_i(t)]$
OR gate				
23		$S(t)$	—	$R(t) = 1.0 - S(t)$
NOT gate				
24		$S(t)$	—	$R(t) = 1.0 - S(t')$ $R(t_1) = 0.0$
Difference operator				
25		—	—	$S(t) \text{ or } P(t)$
Signal generator				
26		$S(t)$	$P(t)$	$R(t) = S(t) \cdot O(t), O(t_1) = P_p$ $O(t) = O(t') + [1.0 - O(t')] \cdot P(t) \cdot P_g$
Closed state operator				
27		$S(t)$	$P(t)$	$R(t) = S(t) \cdot O(t), O(t_1) = 1.0 - P_p$ $O(t) = O(t') \cdot [1.0 - P(t) \cdot P_g]$
Open state operator				

28		$S(t)$	-	$R(t) = S(t-k); (t-k) > 0$ $R(t) = S(t_1); (t-k) \leq 0$
Delay operator				
30		$S_1(t), S_2(t)$ $\dots S_n(t)$	-	$R(t) = \prod_{i=1}^n S_i(t)$
AND gate				
35		$S(t_1), S(t_2)$ $\dots S(t_n)$	$P_1(t_1), P_1(t_2) \dots P_1(t_n);$ $P_2(t_1), P_2(t_2) \dots P_2(t_n); \dots$	$R(t) = S(t) \left[\frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \exp \left\{ -(\lambda + \mu) \sum_i \sum_{t_k \leq t} P_i(t_k) \min \left[1.0, \frac{S(t_k)}{S(t)} \right] \right\} \right]$
Aging work operator				
37		$S(t)$	$P_1(t_1), P_1(t_2) \dots P_1(t_n)$ $P_2(t_1), P_2(t_2) \dots P_2(t_n)$ \dots	$R(t) = S(t) \left[\frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \exp \left\{ -(\lambda + \mu) \sum_i \sum_{t_k \leq t} P_i(t_k) \right\} \right]$
Aging open state operator				
38		$S(t)$	$P_1(t_1), P_1(t_2) \dots P_1(t_n)$ $P_2(t_1), P_2(t_2) \dots P_2(t_n)$ \dots	$R(t) = S(t) \left[1.0 - \frac{\mu}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \exp \left\{ -(\lambda + \mu) \sum_i \sum_{t_k \leq t} P_i(t_k) \right\} \right]$
Aging closed state operator				
39		$S(t)$	$P_1(t)$ $P_2(t)$	$R(t) = S(t) \cdot O(t), O(t_1) = P_P$ $O(t) = O(t') + [1.0 - O(t')] \cdot P_1(t) \cdot P_O$ $O(t) = O(t') \cdot [1.0 - P_2(t) \cdot P_C]$
Open/Close action operator				
40		$S(t)$	-	$R(t) = 1.0; (t < t_i)$ $R(t) = S(t); (t_i \leq t \leq t_j)$ $R(t) = S(t_j); (t_j < t)$
Phased mission operator				

GO-FLOWオペレータ (定義式内の記号の意味)

In this Figure,

$S(t)$ = main input signal S at time point t,

$P(t)$ = sub input signal at time point t,

$R(t)$ = output signal at time point t,

$O(t)$ = probability for valve in open state at time point t,

t' = time point immediately before the time point t,

t_i, t_j = start time point and end time point of a specific phase,

k = number of time points delayed,

P_g = probability for successful operation,

P_p = probability for premature operation,

P_o = probability for valve successful open,

P_c = probability for valve successfully close,

λ = failure rate of a component,

μ = recovery rate of a component.

解析の手順

- GO-FLOWチャートの作成
- 時間推移による状態変化を記述するためタイム・ポイントを定義
- 故障率データ、機器動作タイミング等の割り付け
- 解析プログラムの実行（チャート作成ツールの1つのメニューとなっている）
- 解析結果まとめ

GO-FLOW手法でできること

- 基本解析機能
- 不確実さ解析
- 一つの原因で同時に多数の機器が故障する
共通原因故障解析
- 共通原因故障を考慮した不確実さ解析
- システムの動的挙動の解析が容易
- システムに要求される使命が段階を追って
変化するフェイズド・ミッション問題の解
析が容易

- GO-FLOW解説書、1996
- GO-FLOWプログラム・パッケージの販売開始、1996

GO-FLOWホーム・ページ

<http://mats121.world.coocan.jp/goflowj0.htm>

確率論的安全評価手法によるタイタニック号事故解析ホームページ

<http://mats121.world.coocan.jp/titanic.htm>

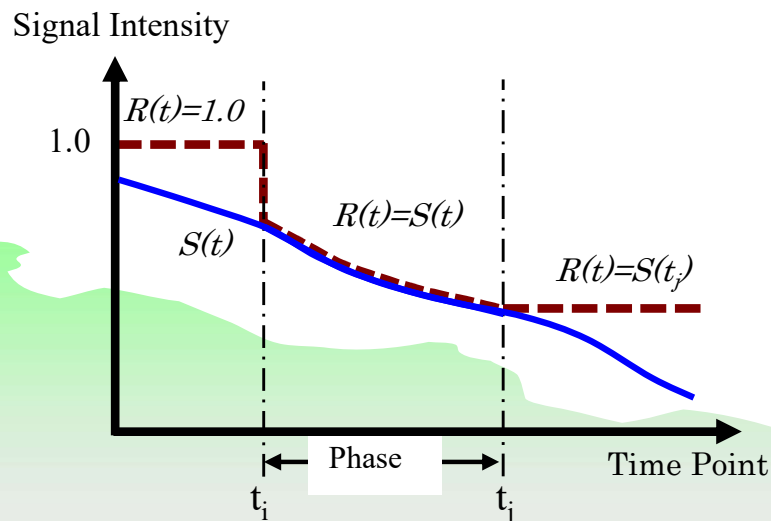


フェイズド・ミッション オペレータ (1)

- 異なった フェイズにおける成功確率間の積を計算する必要があることになる。
- 同一の機器が複数のフェイズに含まれている場合、それらの包含関係を正しく取り扱わなくてはならない。
- GO-FLOW手法では、同一タイム・ポイント内では 信号線間の従属性を正しく処理できるようになっている。
- しかし、フェイズド・ ミッション問題では異なったフェイズ間の積をとる必要がある。つまり、異なったタイム・ポイント間の信号線の積を求める必要がある。そこで、次の図に示す機能を持ったタイプ40オペレータ（フェイズド・ミッション オペレータ）を導入した。

フェイズド・ミッション オペレータ (2)

- 図において青の実線が入力信号線 $S(t)$ の強度で、赤の破線が出力信号線 $R(t)$ の強度である。
- タイム・ポイント t_i で指定された時刻以前においては、出力信号線強度 は入力信号線の強度にかかわらず 1.0 となる。一方、時刻 t_j 以降は信号線強度 は t_j の時の値が凍結されて保持される。



フェイズド・ミッション オペレータ (3)

- しかし、タイプ40オペレータの入力信号線が、より上流の信号線の積/和 (種々の機器類の動作成功確率の積・和) により構成されている場合、このオペレータの出力信号線を構成する信号線の番号をそのままにしておくとも矛盾が出てくる。つまり、同一の信号線に2種類の信号線強度 (確率値) が割り当てられてしまう。
- タイプ40オペレータの出力信号線においては、構成信号線の番号を新たに付け直すようにプログラムされている。その結果、異なった信号線番号間でも従属関係が存在する場合が出てくる。

フェイズド・ミッション オペレータ (4)

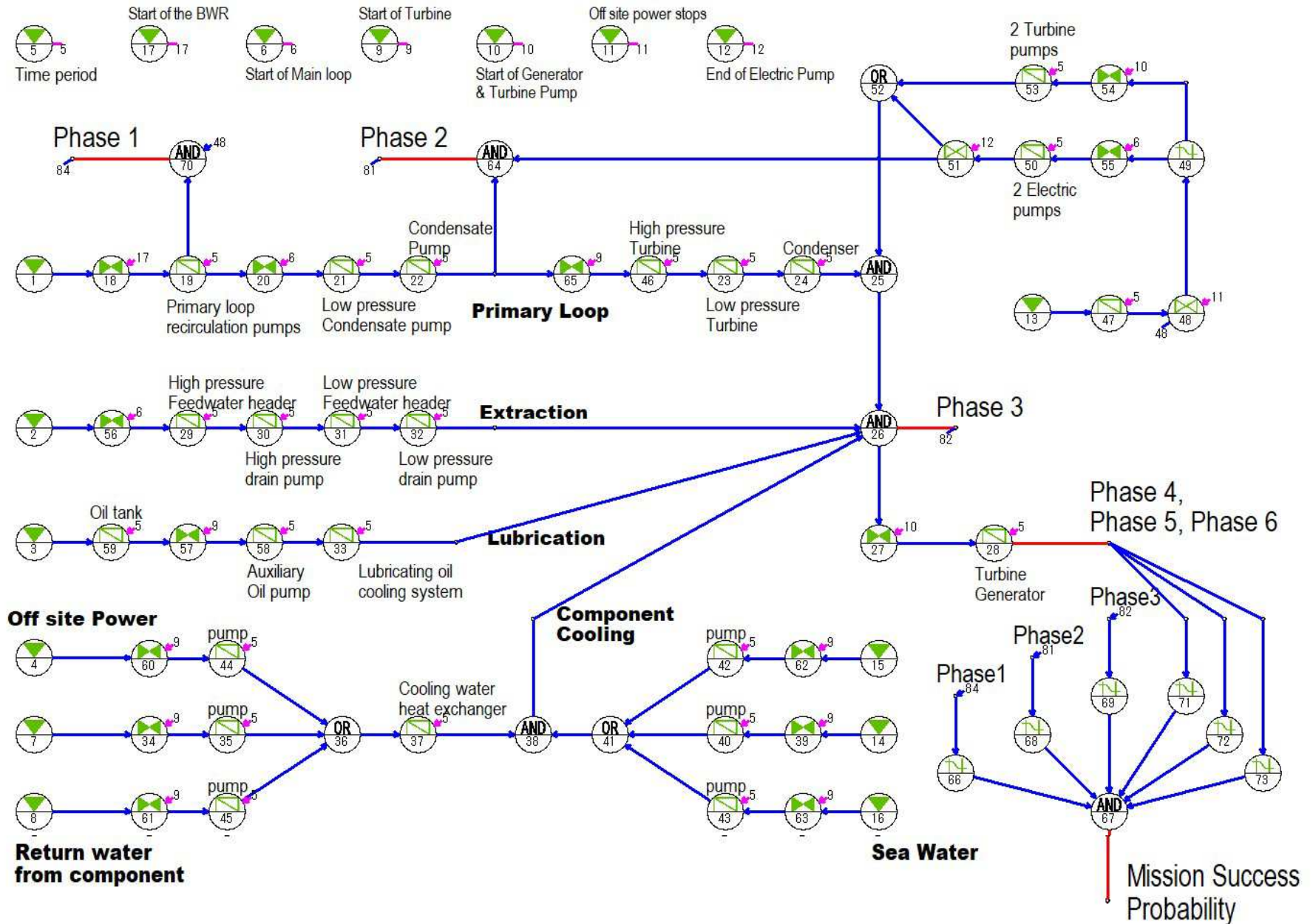
- それらの従属性を判宗するため、元となった信号線番号を情報として保持させている。
- 同一の信号線から作られた信号線を A' 、 A'' とすると、それらの間における ブール代数式は以下のように取り扱う。

- $A' + A'' = A'$; $I(A') > I(A'')$ (1)

- $A' \times A'' = A''$; $I(A') > I(A'')$ (2)

- ここで、 $I(A')$ は信号 A' の強度を意味している。

GO-FLOWチャートへのモデル化



解析結果 (表)

Phase	0	1	2		3		4			5		6				
time(hour)		0	6	22	22	25	25	32	33	33	35	35	72	720	2160	8760
Mission	Preparation	Steam	Main feed water		Turbine operation		Electricity generation			Electricity generation		Electricity generation				
Success Probability	0	0.99927	0.997805	0.997771	0.995510	0.995485	0.996113	0.996056	0.996048	0.996048	0.996032	0.995295	0.994961	0.989117	0.976253	0.938039
Successive mission success probability	0	0.99927	0.997804	0.997771	0.995509	0.995485	0.995385	0.995329	0.995321	0.995321	0.995305	0.994568	0.994234	0.988394	0.975540	0.937354

解析結果 (図1)

T. Matsuoka

Reliability Engineering and System Safety 233 (2023) 109086

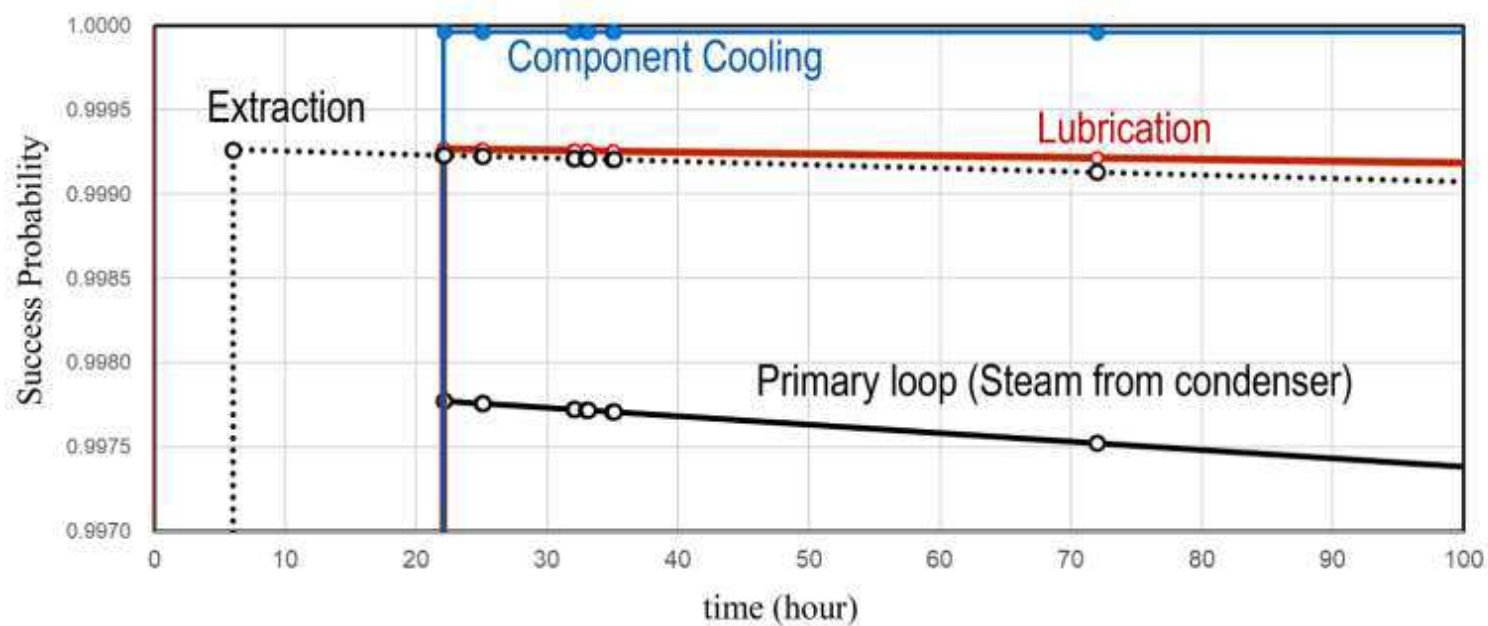


Fig. 11. Reliabilities of essential parts in the BWR plant system.

解析結果 (図2)

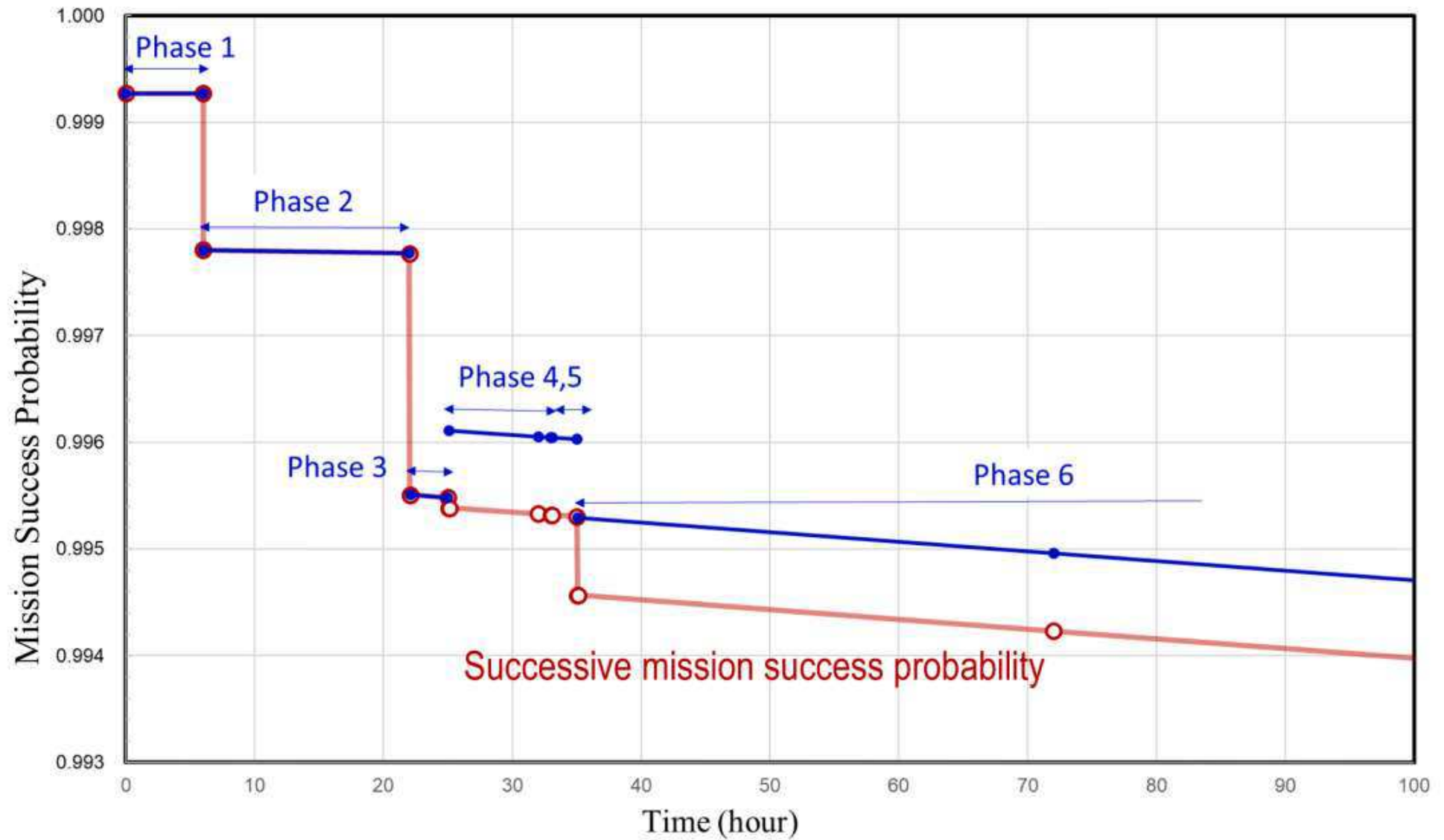


Fig. 12. Mission success probability for phases 1 to 6.

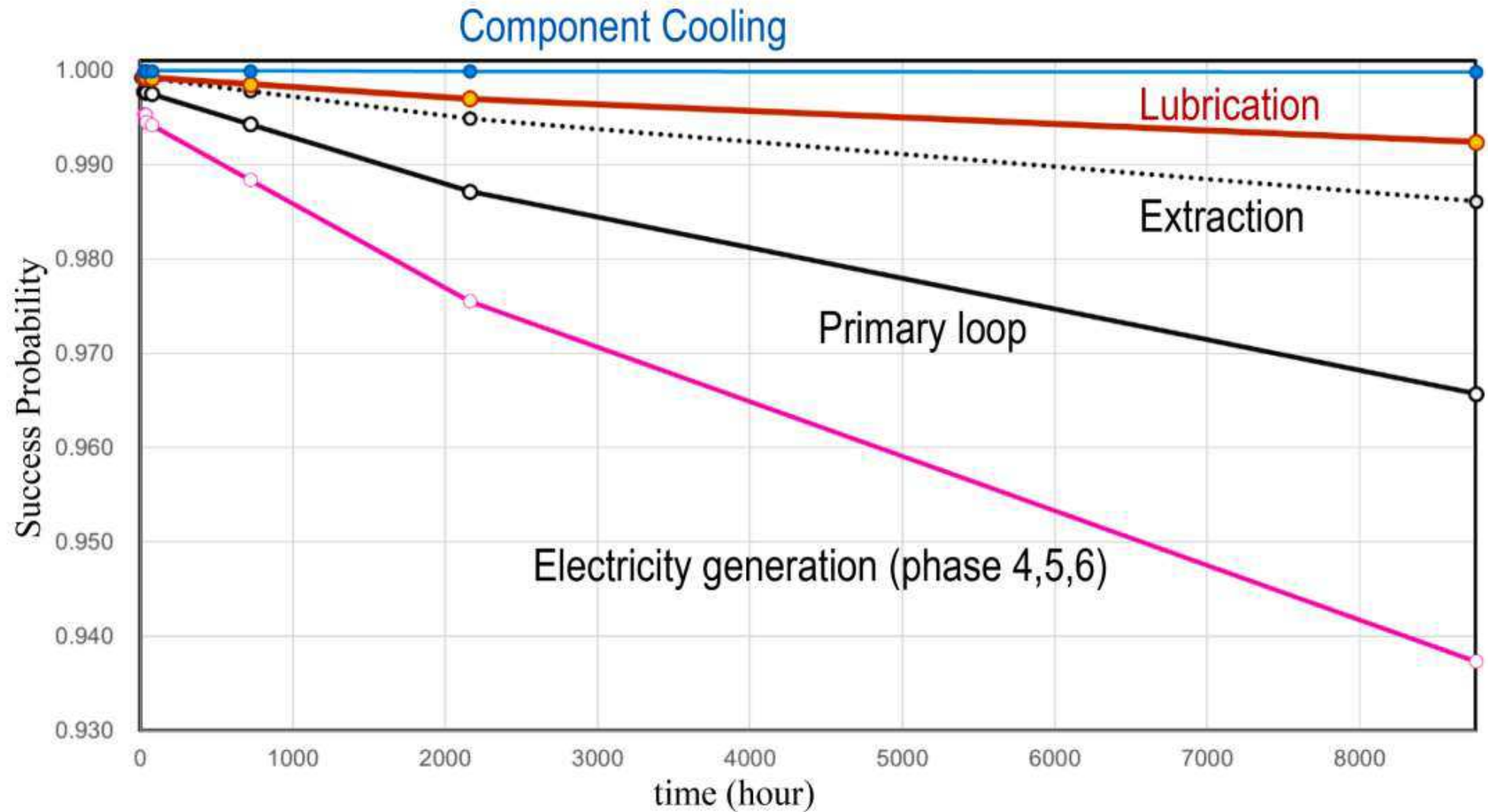


Fig. 13. Long-range trends of essential functions of BWR and electricity generation.

結論・まとめ

- ループ構造を考慮したフェイズドミッションシステムのシステム信頼性解析結果を示した。これは現実の大規模システムの解析例となっている。
- ループ構造を持ったシステムの信頼性解析方法を示した。
- フェイズドミッションシステムの解析の問題点を示した。
- GO-FLOWではループ構造を持ったシステムのPMS解析が容易に実施できる。一枚のチャートに両要素を同時に組み込める。
- ここで示した方法は大規模複雑システムの解析にとって特に有用である。

参考文献

- [1] Burdick GR, Fussell JB, Rasmuson DM, Wilson JR. Phased mission analysis: a review of new developments and an application. *IEEE Trans Reliabil* 1977;43–9. <https://doi.org/10.1109/TR.1977.5215072>. R-26.
- [2] Matsuoka T, Kobayashi M. GO-FLOW: a new reliability analysis methodology. *Nucl Sci Eng* 1988;98:64–78. <https://doi.org/10.13182/NSE88-A23526>.
- [3] Coles GA, Powers TB. Breaking the logic loop to complete the probabilistic risk assessment. In: *Proceeding of PSA'89: international topical meeting on probability, reliability and safety assessment, Pittsburg, PA, April 2–7, 1989. American Nuclear Society; 1989. p. 1155–60.*
- [4] Matsuoka T. A method to solve logical loops in the GO-FLOW methodology. In: *Proceedings of PSAM-V; international conference on probabilistic safety assessment and management, Osaka, Japan, November 27–December 1, 2000. The International Association for PSAM; 2000. p. 1461–5.*
- [5] Yang JE, Han SH, Park JH, Jin YH. Analytic method to break logical loops automatically in PSA. *Reliabil Eng Syst Saf* 1997;56:101–5. [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(96\)00142-1](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(96)00142-1).
- [6] Jung WS, Han SH. Development of an analytical method to break logical loops at the system level. *Reliabil Eng Syst Saf* 2005;90:37–44. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2004.10.005>.
- [7] Lim HG, Jang SC. An analytic solution for a fault tree with circular logics in which the systems are linearly interrelated. *Reliabil Eng Syst Saf* 2007;92:804–7. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2006.04.001>.
- [8] Vaurio JK. A recursive method for breaking complex logic loops in Boolean system models. *Reliabil Eng Syst Saf* 2007;92:1473–5. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2006.09.020>.

- [9] Matsuoka T. An exact method for solving logical loops in reliability analysis. *Reliabil Eng Syst Saf* 2009;94:1282–8. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2009.01.007>.
- [10] McNelles P, Zeng ZC, Renganathan G, Lamarre G, Akl Y, Lu L. A comparison of fault trees and the dynamic flowgraph methodology for the analysis of FPGA-based safety systems Part 1: reactor trip logic loop reliability analysis. *Reliabil Eng Syst Saf* 2016;153:135–50. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2016.04.014>.
- [11] He R, Chen G, Shen X, Jiang S, Chen G. Reliability assessment of repairable closed loop process systems under uncertainties. *ISA Transactions* 2020;104:222–32. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2020.05.008>.
- [12] Chae YH, Kim SG, Seong PH. Reliability of the system with loops: factor graph based approach. *Reliabil Eng Syst Saf* 2021;208:107404. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107407>.
- [13] Chew SP, Dunnett SJ, Andrews JD. Phased mission modelling of systems with maintenance-free operating periods using simulated Petri nets. *Reliabil Eng Syst Saf* 2008;93:980–94. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2007.06.001>.
- [14] Remenyte-Prescott R, Andrews JD, Chung PWH. An efficient phased mission reliability analysis for autonomous vehicles. *Reliabil Eng Syst Saf* 2010;95:226–35. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2009.10.002>.
- [15] Cheng C, Yang J, Li L. Reliability assessment of multi-state phased mission systems with common bus performance sharing considering transmission loss and performance storage. *Reliabil Eng Syst Saf* 2020;199:106917. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.106917>.
- [16] Zhaoa J, Sia S, Caia Z, Guoa P, Zhu W. Mission success probability optimization for phased-mission systems with repairable component modules. *Reliabil Eng Syst Saf* 2020;195:106750. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106750>.

- [17] Lia XY, Lia YF, Huang HZ. Redundancy allocation problem of phased-mission system with nonexponential components and mixed redundancy strategy. *Reliabil Eng Syst Saf* 2020;199:106903. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.106903>.
- [18] Xing L, Levitin G. BDD-based reliability evaluation of phased-mission systems with internal/external common-cause failures. *Reliabil Eng Syst Saf* 2013;112:145–53. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2012.12.003>.
- [19] Levitin G, Xing L, Amari V SV, Dai Y. Reliability of non-repairable phased-mission systems with propagated failures. *Reliabil Eng Syst Saf* 2013;119:218–28. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2013.06.005>.
- [20] Levitin G, Finkelstein M, Xiang Y. Optimal aborting strategy for three-phase missions performed by multiple units. *Reliabil Eng Syst Saf* 2021;208:107408. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107408>.
- [21] Cheng C, Yang J, Li L. Reliability evaluation of a k -out-of- $n(G)$ -subsystem based multi-state phased mission system with common bus performance sharing subjected to common cause failures. *Reliabil Eng Syst Saf* 2021;216:108003. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.108003>.
- [22] Li XY, Xiong X, Guo J, Huang HZ, Li X. Reliability assessment of non-repairable multi-state phased mission systems with backup missions. *Reliabil Eng Syst Saf* 2022;223:108462. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108462>.
- [23] Feng Q, Liu M, Dui H, Ren Y, Sun B, Yang D, Wang Z. Importance measure-based phased mission reliability and UAV number optimization for swarm. *Reliabil Eng Syst Saf* 2022;223:108478. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108478>.
- [24] Wu X, Yu H, Balakrishnan N. Modular model and algebraic phase algorithm for reliability modelling and evaluation of phased-mission systems with conflicting phase redundancy. *Reliabil Eng Syst Saf* 2022;227:108735. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108735>.

- [24] Wu X, Yu H, Balakrishnan N. Modular model and algebraic phase algorithm for reliability modelling and evaluation of phased-mission systems with conflicting phase redundancy. *Reliabil Eng Syst Saf* 2022;227:108735. [https://doi.org/ 10.1016/j.ress.2022.108735](https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108735).
- [25] Nuclear safety research association. Overview of light water nuclear power stations. 2010. <http://www.nsra.or.jp/index-e.html>.
- [26] Matsuoka T. Display of dynamical behavior of nuclear power plant states in risk monitor system - use of the GO-FLOW methodology and interactive update. In: Proceedings of international conference on probabilistic safety assessment and management, PSAM15(1st.-6th November 2020, Venice, Italy); 2020.
- [27] Japan atomic energy society. A standard for procedures of probabilistic safety assessment of nuclear power plants during power operation 2008(Level 1 PSA). 2008 (AESJ-SC-P008).
- [28] IAEA. Survey of ranges of component reliability data for use in probabilistic safety assessment. 1989. IAEA-TECDOC-508, https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_508_web.pdf.
- [29] Matsuoka T. Generalized method for solving logical loops in reliability analysis. In: Proceedings of PSAM-11; international conference on probabilistic safety assessment and management, Helsinki, Finland, 25th-29th June; 2012.
- [30] Matsuoka T. Method for solving logical loops in system reliability analysis. *Nucl Saf Simul* 2010;1:328–39. Journal ID: ISSN 2185-0577; TRN: JP1204188115687.
- [31] Matsuoka T. The GO-FLOW reliability analysis methodology -analysis of common cause failures with uncertainty. *Nucl Eng Des* 1997;175:205–14. [https://doi.org/ 10.1016/S0029-5493\(97\)00038-1](https://doi.org/10.1016/S0029-5493(97)00038-1)

参考文献 5

[32] Matsuoka T. GO-FLOW methodology -basic concept and integrated analysis framework for its applications. *Int J Nucl Saf Simul* 2010;1:198–206.

[33] Matsuoka T, et al. The GO-FLOW methodology; a reliability analysis of the emergency core cooling system of a marine reactor under accident conditions. *Nucl Technol* 1989;84:285–95.
<https://doi.org/10.13182/NT89-A34212>.

[34] Matsuoka T. Chapter 12, Dynamic behavior of nuclear power plant state under severe accident conditions: analysis by the GO-FLOW methodology and the consideration of loop structures. In: Aldemir Tunc, editor. *Advanced concepts in nuclear energy risk assessment and management*. World Scientific Publishing Co Pte Ltd; 2018. p. 427–76. <https://doi.org/10.1142/10587>.

GIO-FLOW解析システムの実演

- ◆ GO-FLOWプログラムパッケージをPCにインストール。
- ◆ チャートエディタを立ち上げ、いかにGO-FLOWモデルを作成するかの手順の説明。
- ◆ 実際に本講演での解析データを用いた解析を行い、解析結果の出力の見方の説明も行います。
- ◆ 比較的簡単にGO-FLOWを使用できることが実感できると思います。

ファイル構成

setup.exe

GFED.exe

GFRUN.exe

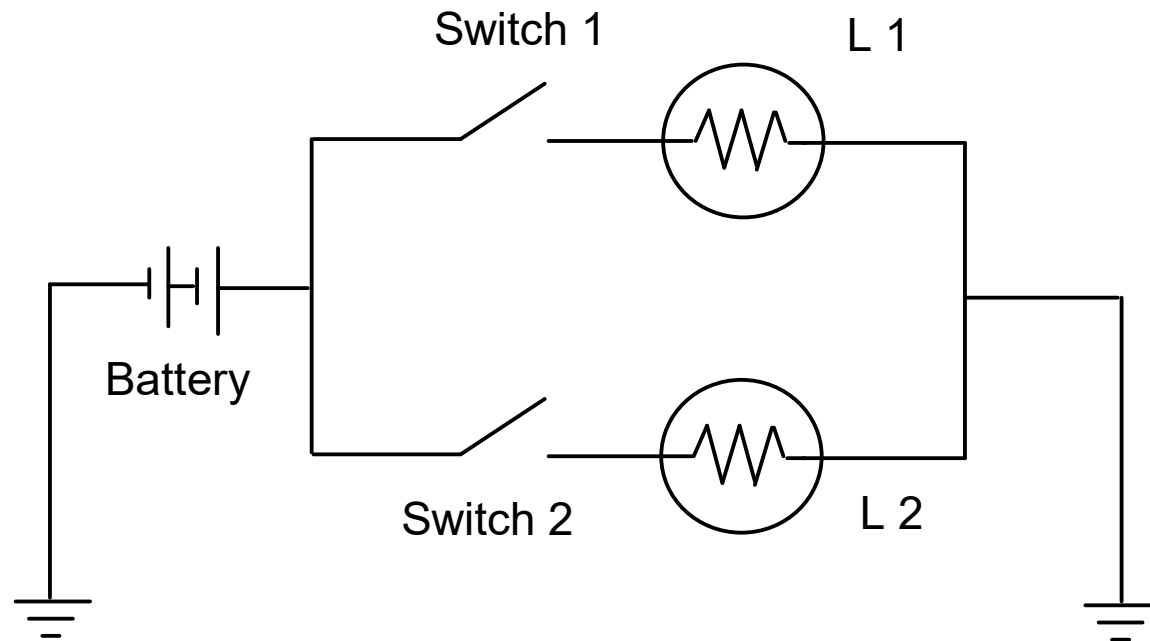
Gfccf.exe

Gf_help.htm

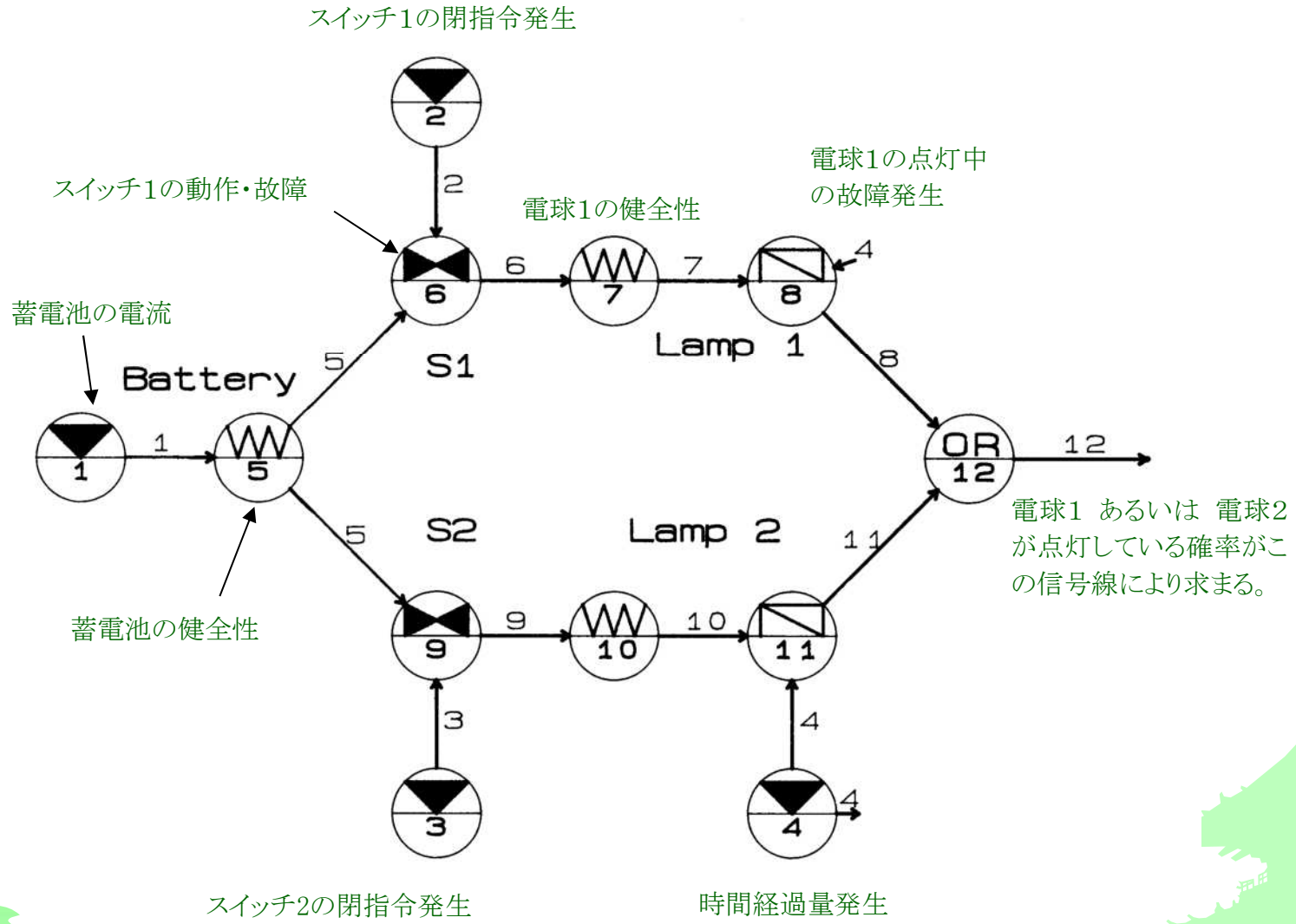
Sample.gfc

Sample.gfd

Sample.lst



サンプル回路図



サンプル回路のGO-FLOWチャート図