



# 大規模工学プラントの緊急時における 対応操作手順導出手法

シンビオ社会研究会第2回研究談話会

令和元年10月25日

岡山大学大学院ヘルスシステム統合科学研究科

五福 明夫

# システミックスの諸相：榎木先生による位置づけ

- ▶ 予期せぬことをうまく処理できる自己組織能力をシステミックに捉える：**Systemic Synthesis**
  - ▶ 予め手順書が用意されていない**不測の事態**が発生した場合に、システム要素の**設計時には想定されていない機能**も活用することにより、事態の収束を可能する**代替の対応操作手順**を生成する手法
  - ▶ **創発的性質**を生かしながら全体を維持し、時間の経過のなかで再組織化を進めつつ、全体的発展をとげる

# 代替対応操作手順生成手法の発想

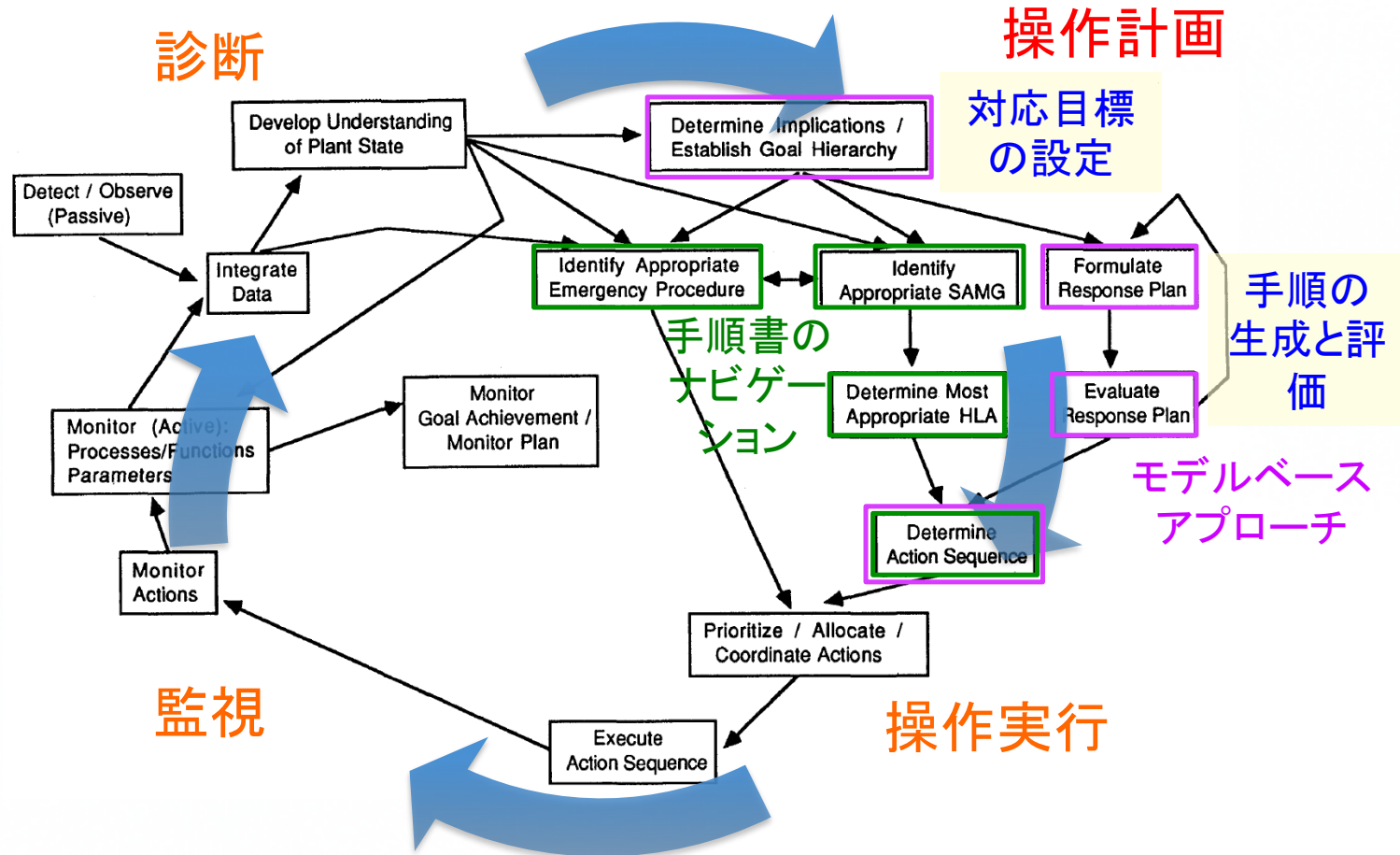
- ▶ 予め準備しておいた資源（resource）や手順書が適用できない事態への対応能力の必要性
  - ▶ 下り坂での車のブレーキ
    - ▶ フットブレーキ, ハンドブレーキ, 車体と崖との摩擦
    - ▶ ハンドブレーキ：
      - ▶ 制動装置の意味では設計目的は同じ
      - ▶ 設計では想定されていない使用法
      - ▶ 車体と崖との摩擦：車体の設計目的も異なる
  - ▶ 東京電力（株）福島第一原子力発電所事故
    - ▶ 対応のための手順や資源が不足
- ▶ 機能モデル（MFMモデル）との出会い
  - ▶ 1993～1994：デンマーク工科大学Lind教授の下で研究
    - ▶ 概念設計支援
  - ▶ 1998：機能と挙動に基づくプラント異常時対応操作候補の導出, システム制御情報学会論文誌, 11 (8), pp. 458-465

# 研究背景と目的

- ▶ 原子力プラントの緊急時の運転員による対応操作
  - ▶ 基本的には緊急時対応の操作手順を事前に準備
    - ▶ その対応操作手順に基づいて実施
- ◇ 1F事故の教訓
  - ◇ 「しなやかに」対応できるようにしておくことが重要
  - ◇ システムティックに、潜在的問題を減らす活動が必要
    - ◇ ハードウェアの改善の必要性 → 設計の見直し
    - ◇ 対応資源の確保
    - ◇ プラントを運用（運転，保守）する組織，現場作業員が万一の事態・リスクに対応できるように育成・訓練
    - ◇ 緊急時の運転員や現場作業員の支援システムの開発
      - ◇ 事故状況から回復できうる代替操作手順を生成できる手法の開発

# 対応操作の計画

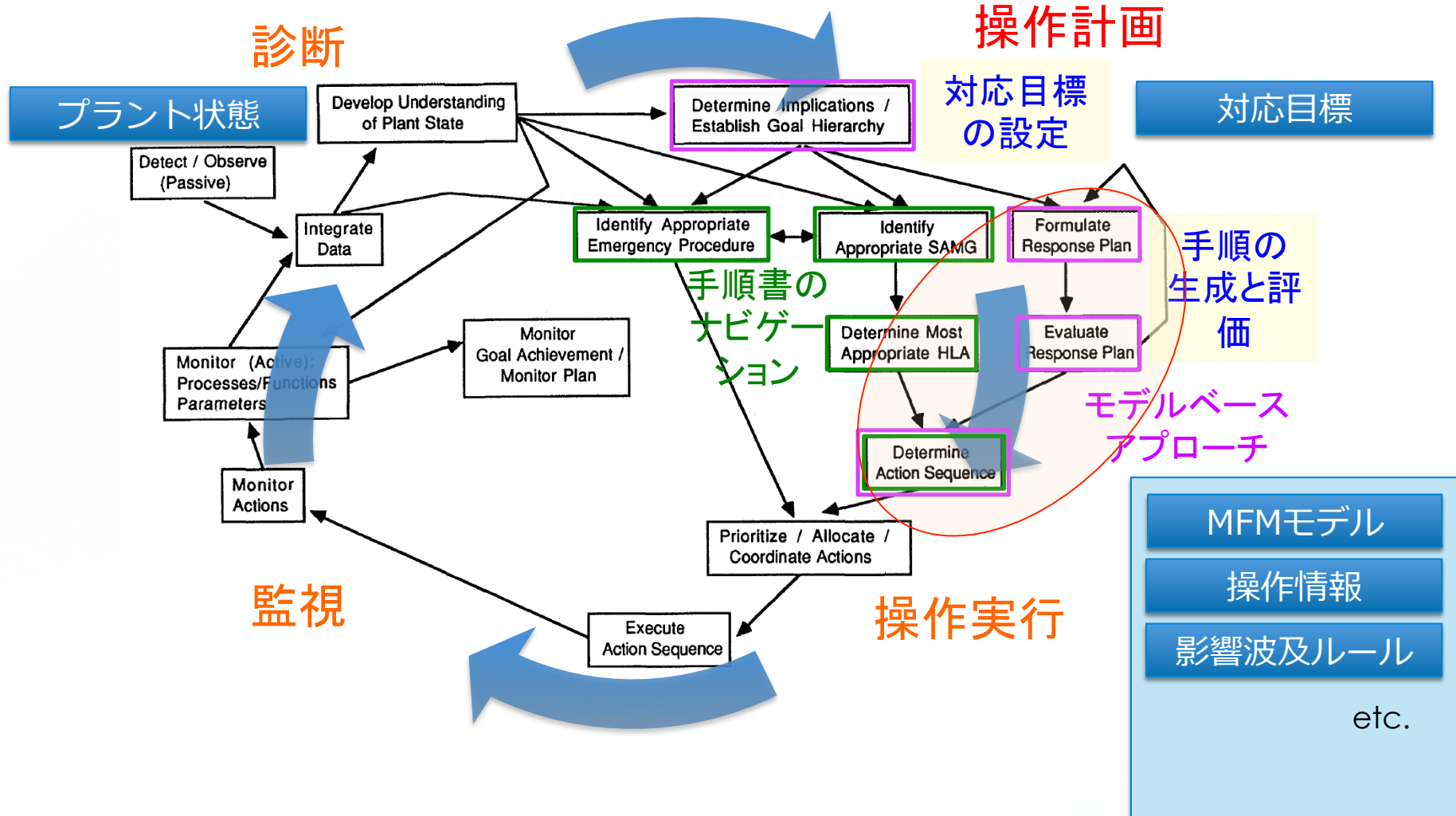
- ▶ 対応目標を達成するための一連の行動（操作）を導く



USNRC, "Cognitive Skill Training for Nuclear Power Plant Operational Decision Making", NUREG/CR-6126, 1994.

# 対応操作の計画

- ▶ 対応目標を達成するための一連の行動（操作）を導く

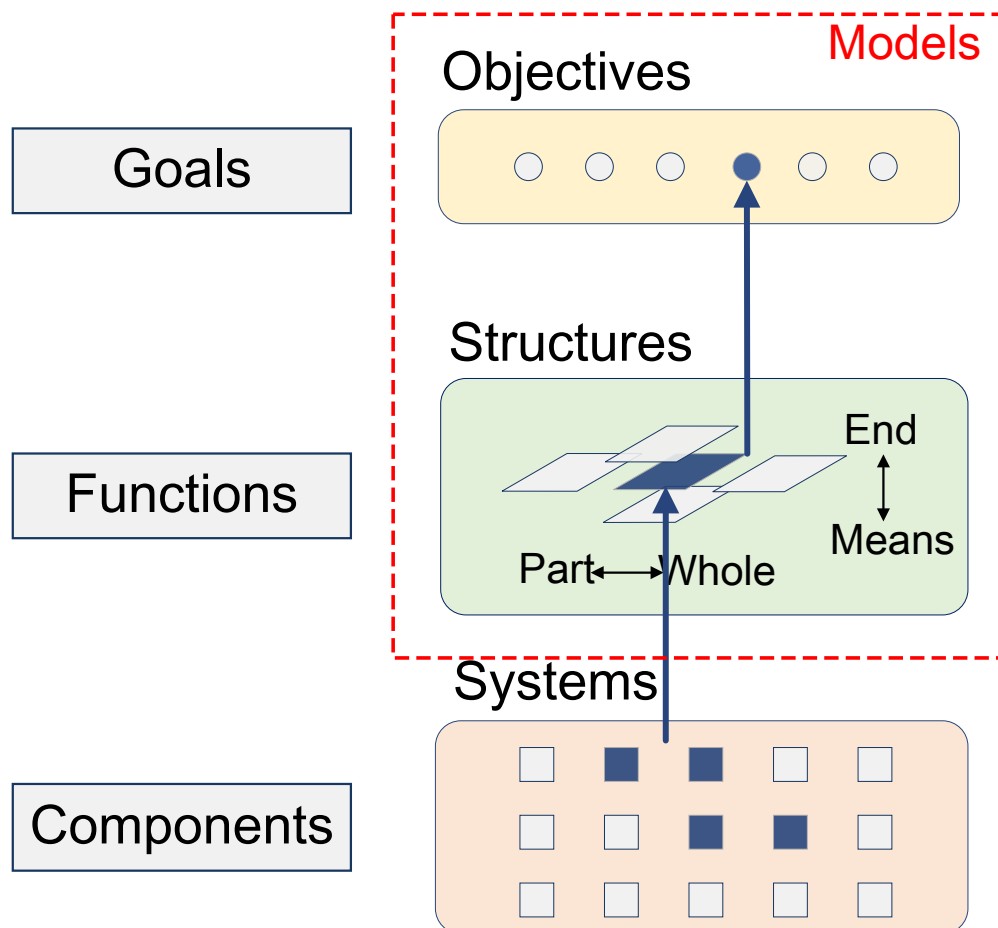


# 機能情報の重要性

- ◇ コンポーネントの機能情報
  - ◇ 原子カプラントなどの大規模複雑システムの設計に重要
- ◇ 機能情報
  - ◇ あるコンポーネントの役割や目的を表している
- ◇ 機能を実現する手段には何通りかある
  
- ◇ 長所
  - ◇ 役割や目的がシステムの振舞（挙動）と関連づけられる
    - ◇ 機能情報を運転員に表示できる
  - ◇ ある種の因果関係が表現されている
  - ◇ 階層的なモデル化能力がある
  - ◇ 言語的表現を含んでいる
    - ◇ 推論結果の表示における意味的ギャップを緩和できる




























# Multilevel Flow Modelling (MFM)

- ▶ 工学システムを手段と帰結の観点からモデル化する方法論
- ▶ システムを2つの軸から表現
  - ▶ 手段-方法の軸
  - ▶ 全体-部分の軸
  - ▶ プリミティブな機能の記号を用いる
    - ▶ 目標, 機能やそれらの関係をグラフィ的に表現
- ▶ システムの機能は, 質量, エネルギー, 行動, 情報の集合で表現
- ▶ 構造情報とは実現関係によって関係づけて表現





# MFMのシンボル

Functions				
Mass and Energy Flow		Control		
source 	transport 	storage 	conversion 	
sink 	barrier 	balance 	separation 	
	distribution 			
		steer 	trip 	
		regulate 	suppress 	
Targets	Relations			
objective 	influence	Means-end		Control
threat 	influencer 	produce 	maintain 	enable 
function structure 	participant 	destroy 	suppress 	disable 
		mediate 	producer-product 	actuate 

## 目標

システムやコンポーネントの役割

## 機能流れ構造

質量とエネルギーの流れ

## Functions

機能を表現

## Relations

目標と機能および機能間の関係

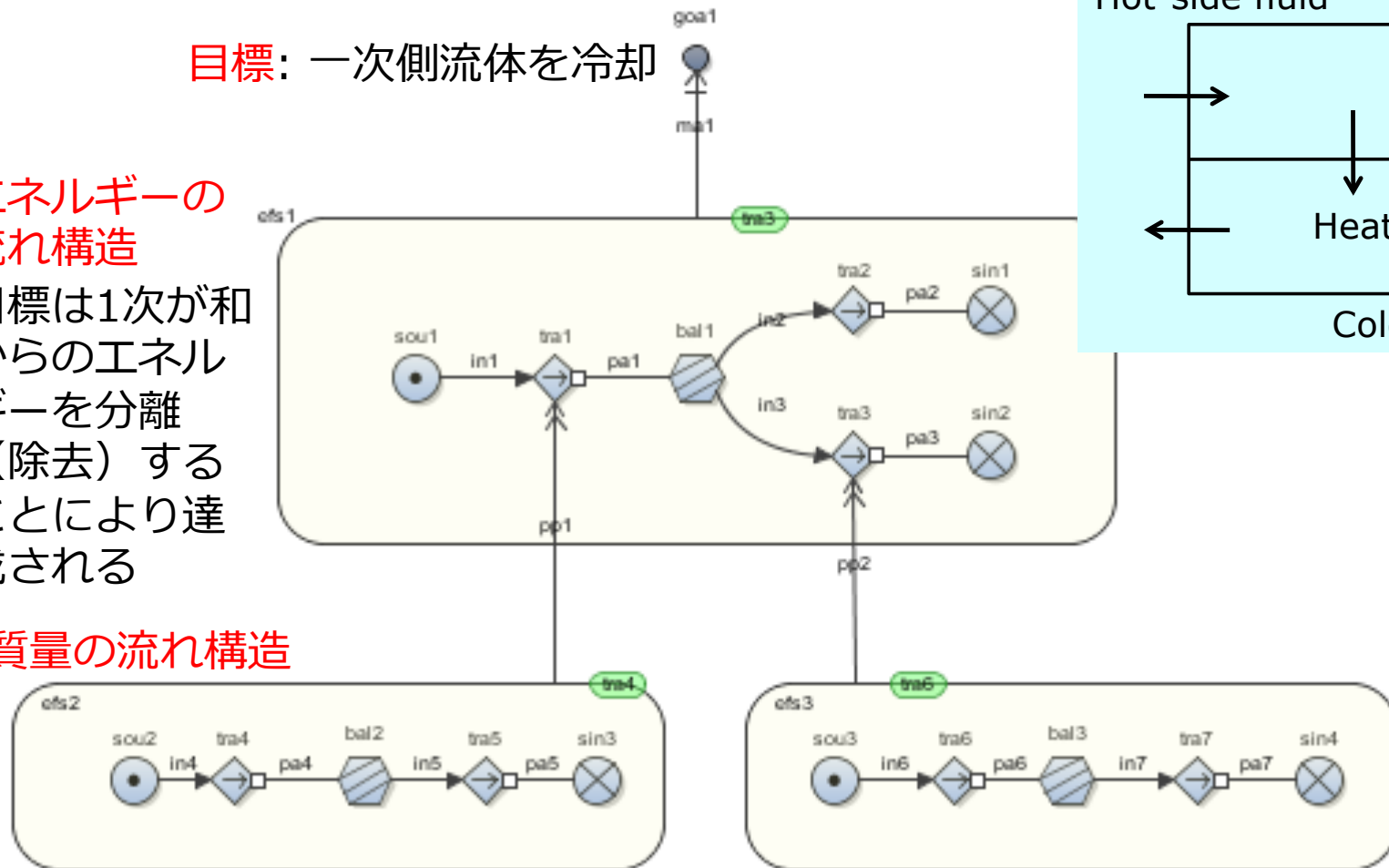
# 冷却器のMFMモデル

目標: 一次側流体を冷却

エネルギーの  
流れ構造

目標は1次が和  
からのエネルギーを分離  
(除去) する  
ことにより達成される

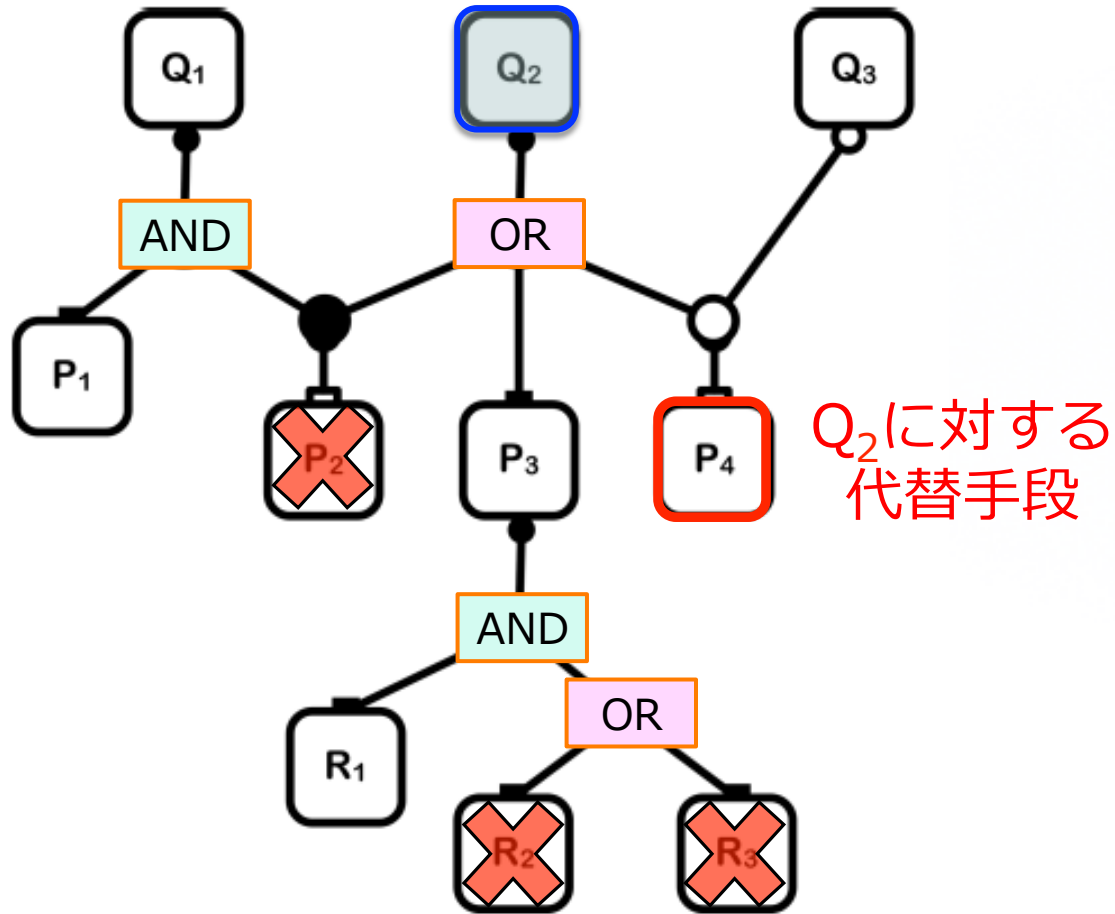
質量の流れ構造



2次側の流れは1次側の流れとともに、1次側の流れからエネルギーを連続的に分離(除去)するために必要

# MFMモデルの特徴（多対多マッピング）

所与の帰結を達成する  
ための手段を検索

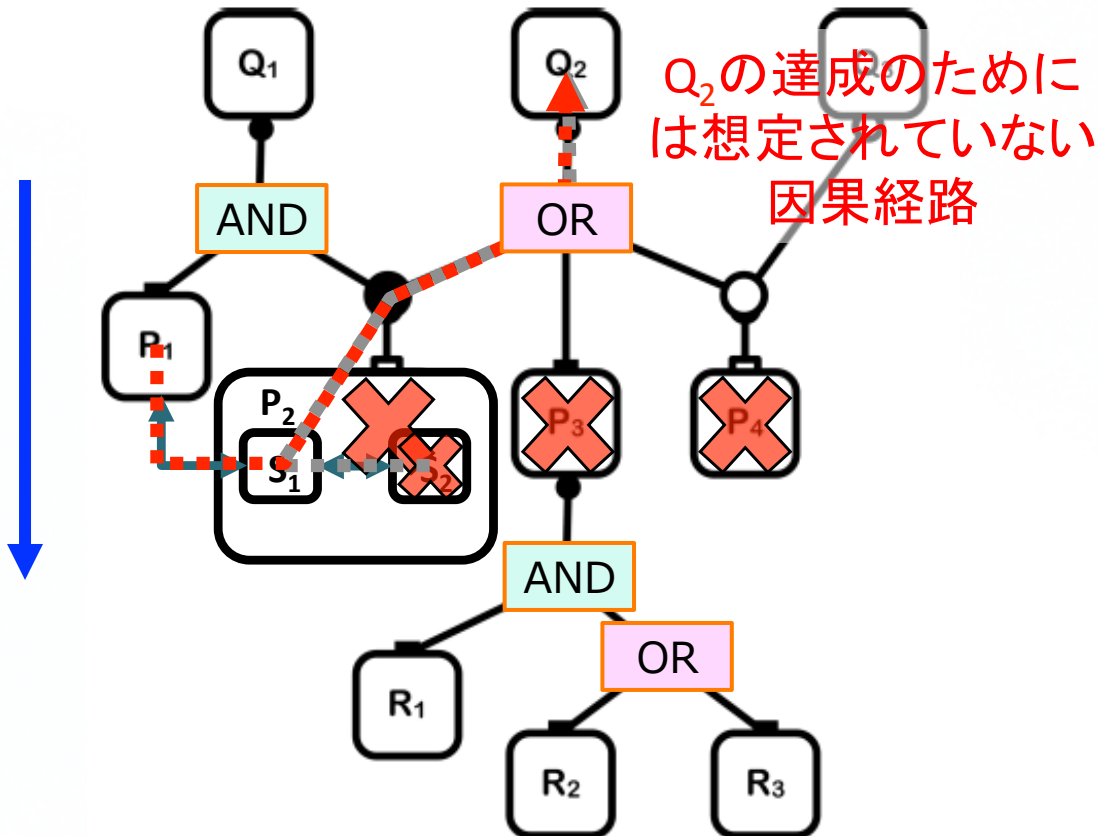


Means-end階層

# MFMモデルの特徴（因果関係の表現）

- ▶ 手段は帰結を引き起こす
- ▶ 手段は相互に因果関係がある

所与の帰結を達成する  
ための手段を検索



Means-end階層

# MFMモデルに基づく因果推論

- MFMモデルにおいて表現された関係
  - 目標と流れ構造間
    - 必要十分条件を表している
  - 1つの流れ構造内での機能シンボル間の関係
    - 質量あるいはエネルギーのバランスを表している
- 関係に沿って因果を推論できる
- シンボルと関係の組合せに応じて、あらかじめ因果推論ルールを導出しておく
  - 旧MFMシンボルに対するルール集合 [Gofuku, 1998]
  - 新MFMシンボルに対するルール集合 [Zhang, 2013], [Inoue, 2014]

# 必要なデータと情報

- 基礎モデルとしてのMFMモデル
- MFMシンボル間の影響波及ルール
  - MFMシンボルの状態に対する操作の影響推論に用いる
- コンポーネントの状態に関する情報
  - コンポーネントのトラブル状態の影響をMFMモデルへ反映する
    - トラブルのタイプとその機能的影響
- 操作に関する情報
  - プラント状態を望ましいものに変更できる操作の探索に用いる
    - 操作のタイプ, その機能的影響, 及び操作の条件
- 視点変更による目標の書き換えルール
  - 対応操作目標と同じ意味のMFMモデルの目標の検索に用いる

# MFMのシンボルの状態の定義

機能 / 目標	状態
Source	Normal, High flow potential, Low flow potential
Sink	Normal, High input flow, Low input flow
Transport	Normal, High flow, Low flow, No flow
Storage	Normal, High volume, Low volume
Barrier	Normal, Leak
Balance	Normal, Unbalance (Fill or Leak)
Objective	True (High), True (Low), False
Treat	Exist (High), Exist (Low), Non-exist

# 影響波及ルール

▶ 100以上のシンボルの組合せのそれぞれに対してルール

パターン	原因	影響
	<b>sou1</b>	<b>tra1</b>
	High flow potential	High flow
	Low flow potential	Low flow
	<b>sou1</b>	<b>tra1</b>
	High flow potential	High flow
	Low flow potential	Low flow
	<b>sou1</b>	<b>bar1</b>
	High flow potential	Normal
	Low flow potential	Leak
	High low potential	Normal

パターン	原因	影響
	<b>tra1</b>	<b>obj1</b>
	<b>High flow</b>	<b>True (high)</b>
	Low flow	True (low)
	No flow	False
	<b>tra1</b>	<b>tra2</b>
	High flow	High flow
	Low flow	Low flow



# 対応操作手順の生成・選択アルゴリズム

Step 1: プラント状態に応じてMFMモデルを修正  
(異常発生機器や利用できない機器に対応する機能部分)

Step 2: 対応操作の目標設定

Step 3: 設定目標を様々な視点から再記述  
(MFMモデル上の目標記述との照合のため)

Step 4: 設定目標やStep 3によるその再記述を  
MFMモデルの目標/サブ目標から検索

Step 5: 影響波及ルールを用いて,  
変更すべき挙動や操作を探索

Step 6: 発見された  
挙動や操作の実施可能性を  
確認

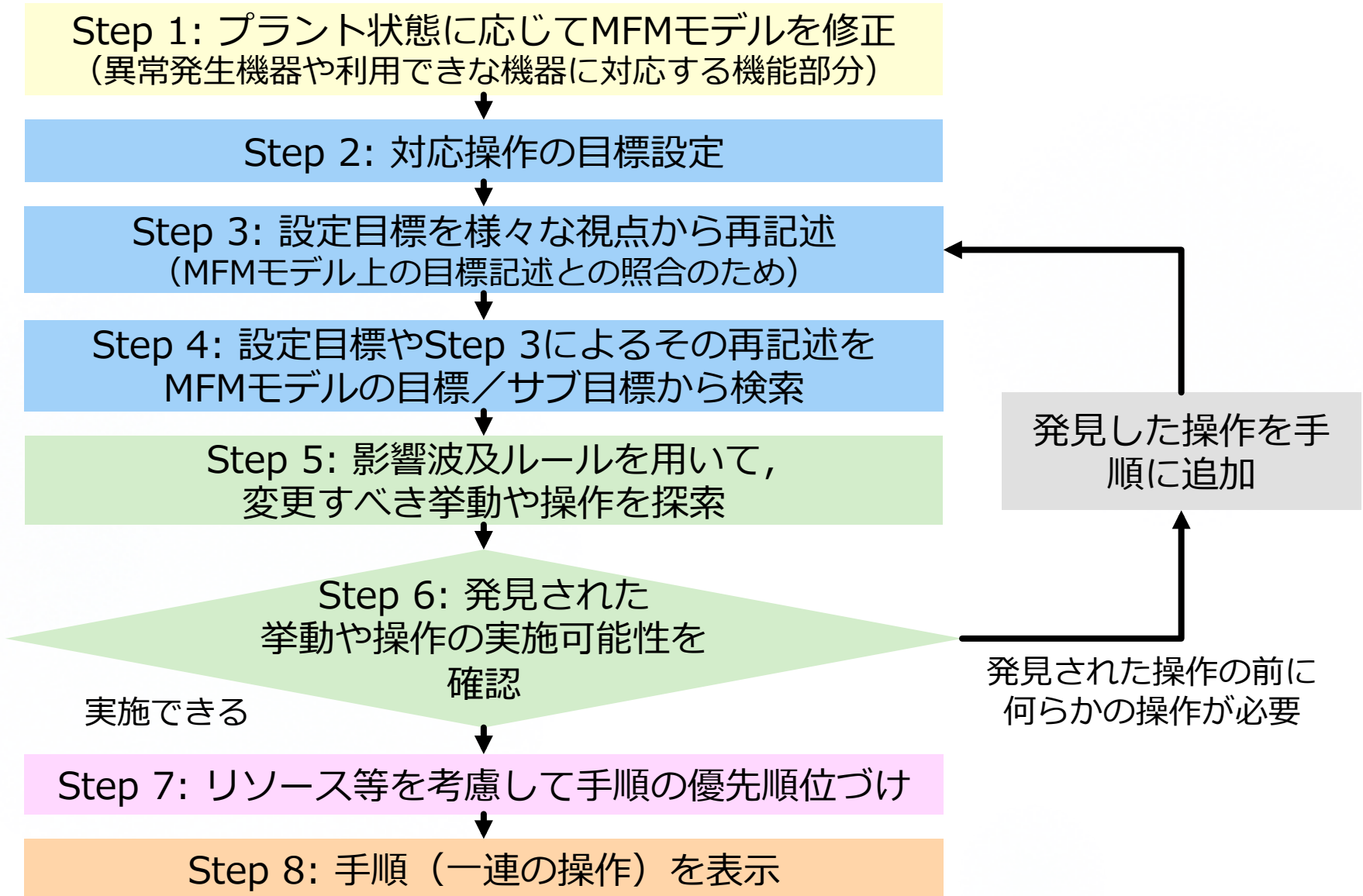
実施できる

Step 7: リソース等を考慮して手順の優先順位づけ

Step 8: 手順 (一連の操作) を表示

発見した操作を手  
順に追加

発見された操作の前に  
何らかの操作が必要

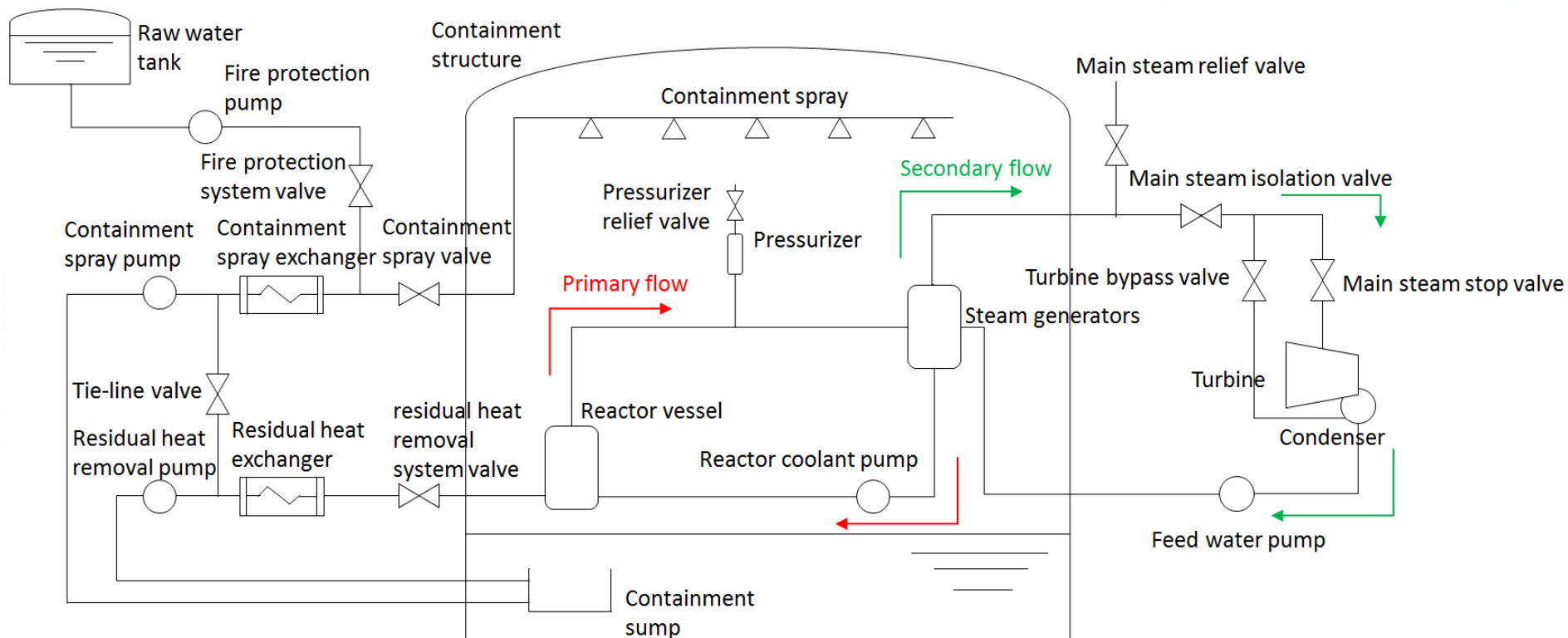


# 操作手順導出の例題

対象プラント：加圧水型原子力炉 (PWR)

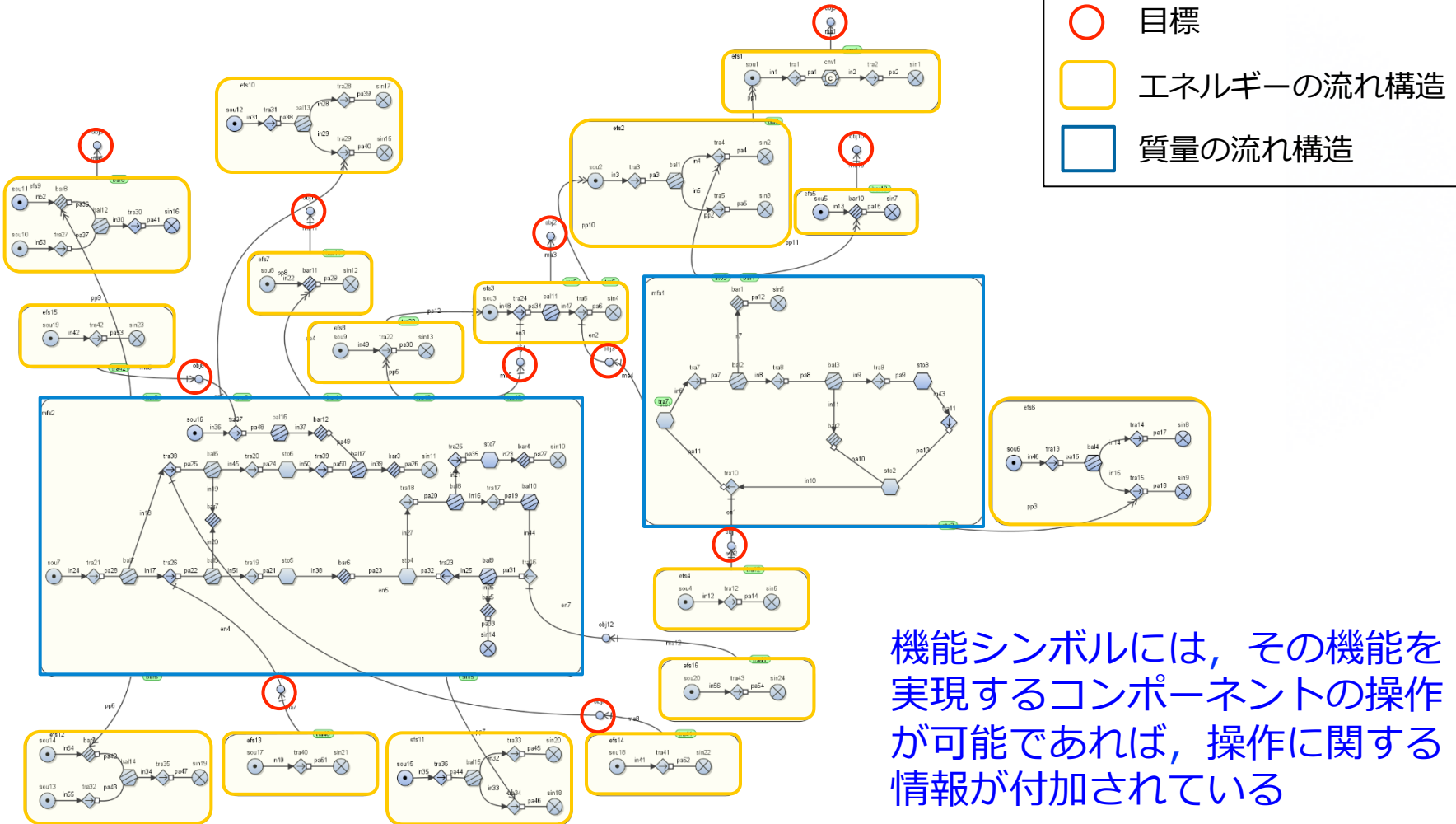
モデル化対象システム：

一次系ループ，二次系ループ，一部の安全系



# PWRプラントのMFMモデル

目標, 質量の流れ構造, エネルギーの流れ構造



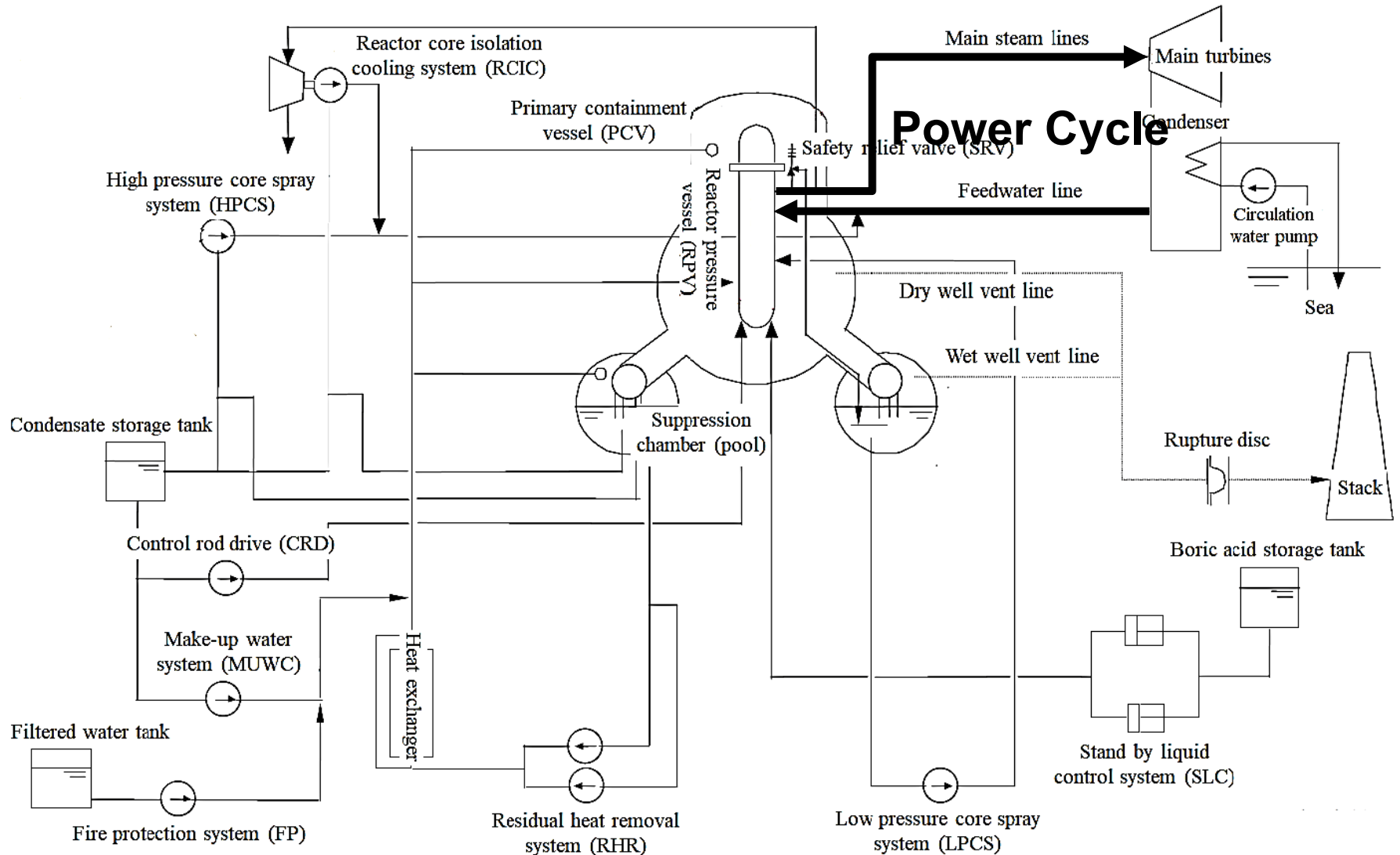
# 手順生成の試行

- ◇ PWRプラントで設定されているAM
  - ◇ タービンバイパス系の使用
  - ◇ 代替再循環
  - ◇ 原子炉格納容器への注水
- ◇ 状況A：ECCSと主蒸気解放弁の故障を伴うLOCA

生成手順		AM
a	1. 主蒸気隔離弁開 2. タービン弁開	1. 主蒸気隔離弁開 2. タービン弁開 (タービンバイパス系の使用)
b	1. 加圧器解放弁開	

- ◇ 状況A～Cのいずれの場合でも,
  - ◇ AMに対応する操作手順が導出され,
  - ◇ 負の影響緩和に効果的と考えられる他の手順が導出された

# BWR/6の構成



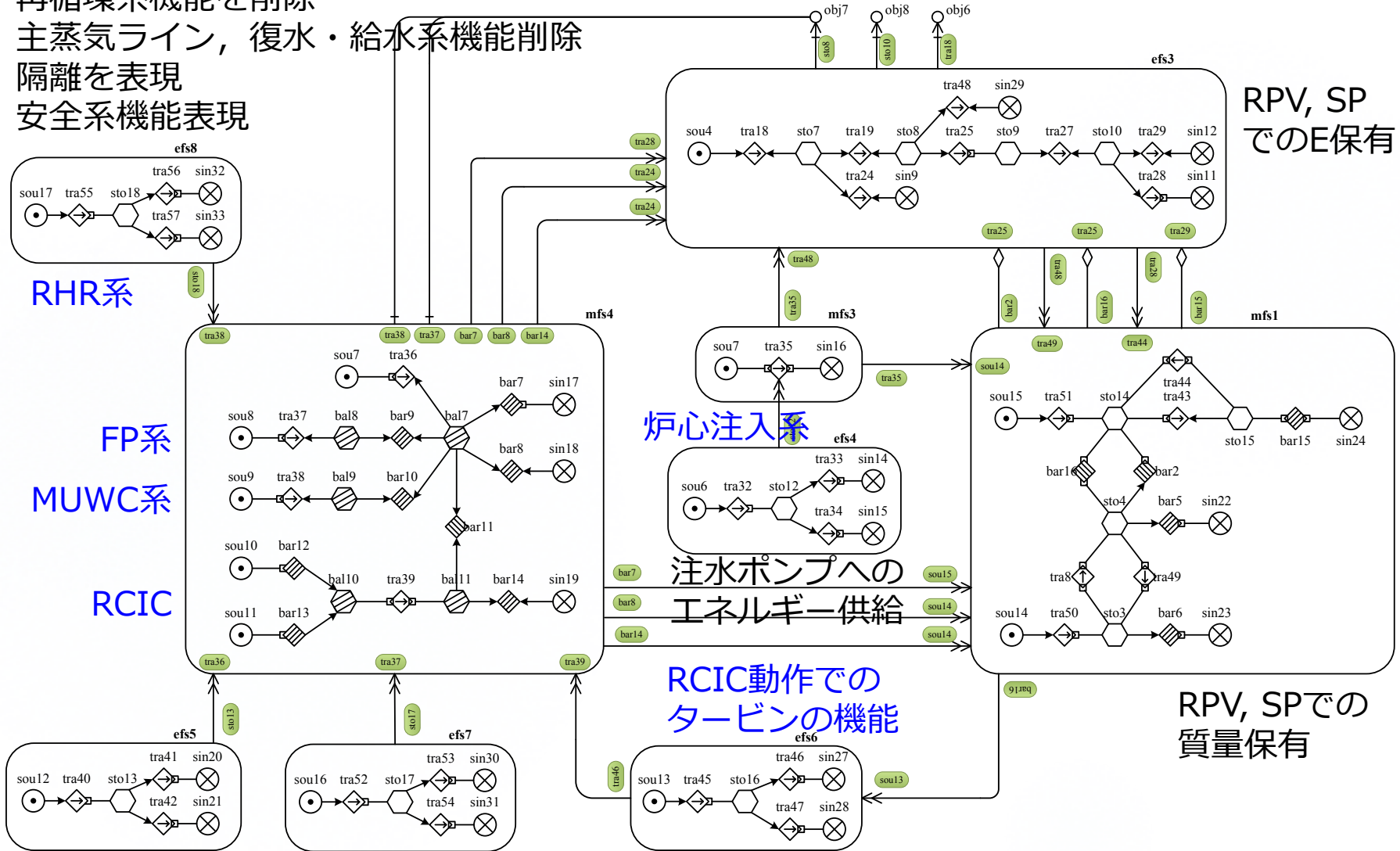
## Auxiliary Systems

# BWR/6のMFMモデル（スクラム後）

- ▶ プラントの目標
  - ▶ 原子炉からの熱除去の維持
  - ▶ 原子炉容器の減圧と温度降下
  - ▶ 格納容器チャンバの減圧と温度降下
  - ▶ （事故事象に依存して、異なった目標集合が設定される）
- ▶ スクラムにより、プラント機能のいくつかが停止
  - ▶ これらの機能はモデルでは考慮しない
    - ▶ 制御棒による反応度調節機能
    - ▶ 主蒸気ラインや復水・給水の機能
- ▶ 安全系の動作を考慮する必要
  - ▶ 格納容器
  - ▶ ECCS
  - ▶ RCIC, など

# BWR/6のMFMモデル (スクラム後)

制御棒の機能を削除  
 再循環系機能を削除  
 主蒸気ライン, 復水・給水系機能削除  
 隔離を表現  
 安全系機能表現



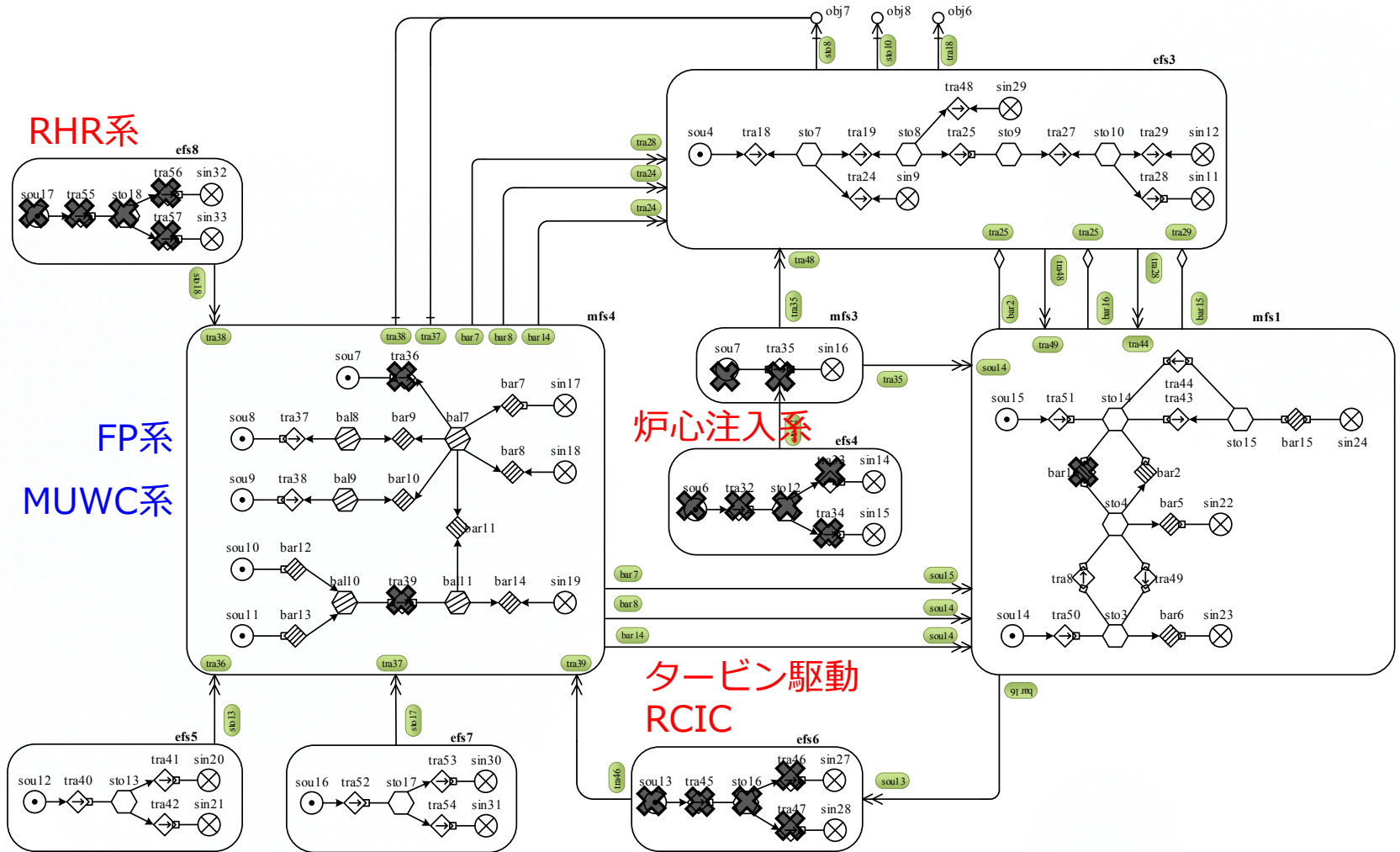
# 操作可能コンポーネント (スクラム後)

コンポーネント	機能シンボル	コンポーネント	機能シンボル
格納容器への開放弁類	bar15	凝縮水輸送ポンプ	tra38
ECCSポンプ電源供給	tra35	MUWCバルブ	bar10
RHRポンプ (ECCSのLPCI)	tra36	RCICシステム弁1	bar12
低圧注入弁	bar7	RCICシステム弁2	bar13
格納容器スプレイ弁	bar8	RCICシステム弁3	bar14
FPポンプ	tra37	RCIC駆動タービン弁	bar16
FPバルブ	bar9	MUWCバルブ	bar10



# 想定したプラント状態

- ▶ 操作不能系統：RHR系，RCIC系，炉心注入系





# 生成された手順と妥当性評価

	手順1	手順2	手順3	手順4	手順5
1	SRV開	SRV開	SRV開	SRV開	SRV開
2	FPポンプ起動	凝縮水移送バルブ開	FPポンプ起動	凝縮水移送バルブ開	
3	FPバルブ開	MUWCバルブ開	FPバルブ開	MUWCバルブ開	
4	低圧注入バルブ開	低圧注入バルブ開	接続バルブ開	接続バルブ開	
5			RCIC注入バルブ開	RCIC注入バルブ開	

- ▶ ベテラン運転員による評価：生成手順は炉心冷却に効果
  - ▶ 圧倒的に手順2
    - ▶ MUWCポンプ容量 > FPポンプ容量
    - ▶ 接続バルブの口径小さい
  - ▶ 手順5は時間稼ぎの場合（RPVが壊れないために）

# まとめと今後の課題

- ▶ **目的**：緊急時の運転員による対応操作手順の計画を支援
- ▶ **方法**：対応操作手順生成手法の開発
  - ▶ PWRプラントのAM導出への適用
  - ▶ BWRプラントのRHR系，RCIC系，炉心注入系の故障時への適用
- ▶ **今後の課題**
  - ▶ **必要データの設定支援**
  - ▶ 生成対応操作の**優先づけ手法**の開発
  - ▶ 生成対応操作の有効性の運転員への**説明手法**の開発
  - ▶ **Systemic Synthesisへの発展**
    - ▶ 予期せぬことをうまく処理できる自己組織能力をシステムに捉える
    - ▶ **飛躍**：柔軟な視点の変更，発想の転換や連想

ご清聴ありがとうございました。