


# 第36回 研究報告会 操作失敗の原因に着目した人的 過誤確率の算出方法の開発

2023年7月6日（木）

技術基盤グループ シビアアクシデント研究部門

西小野 華乃子

 本資料のうち、枠囲みの内容は事業者の商業機密を含む非公開情報のため、公開できません。

# 目次



背景・モチベーション

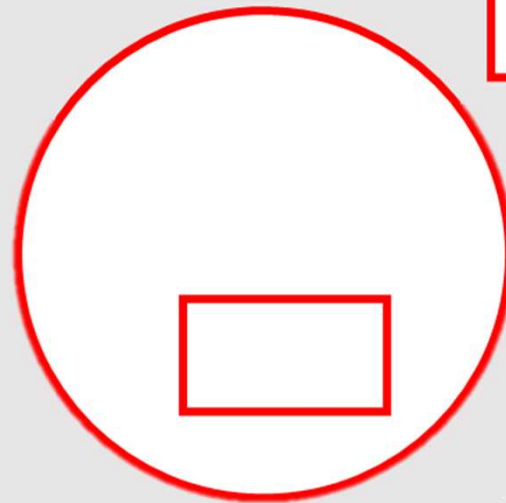
プロジェクトビジョンとこれまでの研究成果

将来の展望

## 1-1. 炉心が損傷する確率に占める人的過誤の割合は大きい

- 炉心の損傷は機器故障や運転員操作の失敗が重なった場合に発生する
- 自動起動する機器が故障した際、運転員は手動で代替の機器を起動させるため、炉心の損傷に至る過程では、多くの場合運転員操作が介在している

炉心の損傷に至る要因の一つに人の操作失敗を含まないもの



炉心の損傷に至る要因の一つに  
人の操作失敗を含むもの

## 1-2. 原子炉施設の運用における人的過誤の寄与

- ▶ 原子炉施設の運用における人的過誤が原因となった調査事例
  - 原子炉施設で発生する機器故障（System failure）のうち65%が人的過誤が原因である（NRC, 1985）
  - 1978-1992年に韓国で発生した原子炉停止に至った事象255件のうち、77件は人的過誤が原因である（Heo, G et al., 2010. Lee, J.W et al., 1996）
- ▶ 原子炉施設の安全性を向上させるために運転パフォーマンス情報を効率的に活用していくことは重要である（IAEA, 1999）

原子炉施設における人的過誤は主要なリスク要因であり、  
運転パフォーマンス情報の活用が重要である

## 1-3. 人的過誤の算出の現状

リスクの観点から、人的過誤は炉心損傷への寄与も大きいことが知られているにも関わらず、

- 人的過誤確率の算出手法は、  
専門家の知見に基づいた工学的判断に依存した条件設定が多く、
- 確率を算出したデータは米国のものを使用している。



検査等の意思決定にリスク情報を使用するためには、現実的な人的過誤確率を算出できるものが好ましい。

# 1-4. 人間信頼性解析手法の活用と課題

## THERPの解析手順

1. 解析対象となる行動の特定
2. HRAイベントツリー作成
3. 行動形成因子の特定/影響決定
4. 依存性解析
5. 人的過誤確率算出

## 1-4. 人間信頼性解析手法の活用と課題

### THERPの解析手順

1. 解析対象となる行動の特定
2. HRAイベントツリー作成
3. 行動形成因子の特定/影響決定
4. 依存性解析
5. 人的過誤確率算出

因果関係のモデル化の科学的根拠が乏しい



## 1-4. 人間信頼性解析手法の活用と課題

### THERPの解析手順

1. 解析対象となる行動の特定
2. HRAイベントツリー作成
3. 行動形成因子の特定/影響決定
4. 依存性解析
5. 人的過誤確率算出

因果関係のモデル化の科学的根拠が乏しい  
+  
専門家の知識に基づく判断



# 1-4. 人間信頼性解析手法の活用と課題

## THERPの解析手順

1. 解析対象となる行動の特定
2. HRAイベントツリー作成
3. 行動形成因子の特定/影響決定
4. 依存性解析
5. 人的過誤確率算出

因果関係のモデル化の科学的根拠が乏しい



専門家の知識に基づく判断



人的過誤の劣化状態、原因、有用な対策について  
**定量的な指標を基に議論することが難しい**

# 1-4. 人間信頼性解析手法の活用と課題

## THERPの解析手順

1. 解析対象となる行動の特定
2. HRAイベントツリー作成
3. 行動形成因子の特定/影響決定
4. 依存性解析
5. 人的過誤確率算出

因果関係のモデル化の科学的根拠が乏しい



専門家の知識に基づく判断



人的過誤の劣化状態、原因、有用な対策について  
**定量的な指標を基に議論することが難しい**



## 新しい手法の開発

- 専門家知識に依存しない
- 科学的根拠に基づく

# 目次



背景・モチベーション

プロジェクトビジョンとこれまでの研究成果

将来の展望

## 2-1. 現在開発中の手法の概要

	THERPの派生版	モデルベースの新手法
	SPAR-H	Phoenix
開発元	アイダホ国立研究所, 米国原子力規制委員会	米国カリフォルニア大学
開発された年	1994 (1999, 2004年にアップデート)	2016 (2021年に改訂版リリース)
主な活用者	米国原子力規制委員会	<b>原子力規制庁と共同で開発・改良中</b>
因果関係モデル	なし	ベイジアンビリーフネットワーク
依存性解析機能	専門家判断に基づく5段階評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>ベイジアンビリーフネットワーク</li> <li>ベイジアンアップデート</li> </ul>

参考 : Gertman, D.I., Blackman, H.S., Marble, J.L., Smith, C., Boring, R.L., O'Reilly, P. "The SPAR H human reliability analysis method.; Human Factors, Robotic, and Remote Systems," Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, Idaho Falls, United States, pp. 17-24 (2004), NUREG-6883.  
 Ekanem, N. J. et al. (2016) "Phoenix —A model-based Human Reliability Analysis methodology: Qualitative Analysis Overview."  
 Ramos, M et al. "Phoenix Human Reliability Analysis Method: Application to a Feed and Bleed Operation", PSA2021 proceedings, (2021)

## 2-2. 人的過誤の種類

### SPAR-H

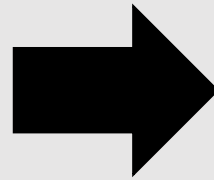
✓ 人的過誤の種類は2種類のみ



• **診断**  
(Diagnosis)



• **操作**  
(Action)



### Phoenix

✓ 人的過誤の種類が細分化されている



• **情報収集**  
(information gathering)

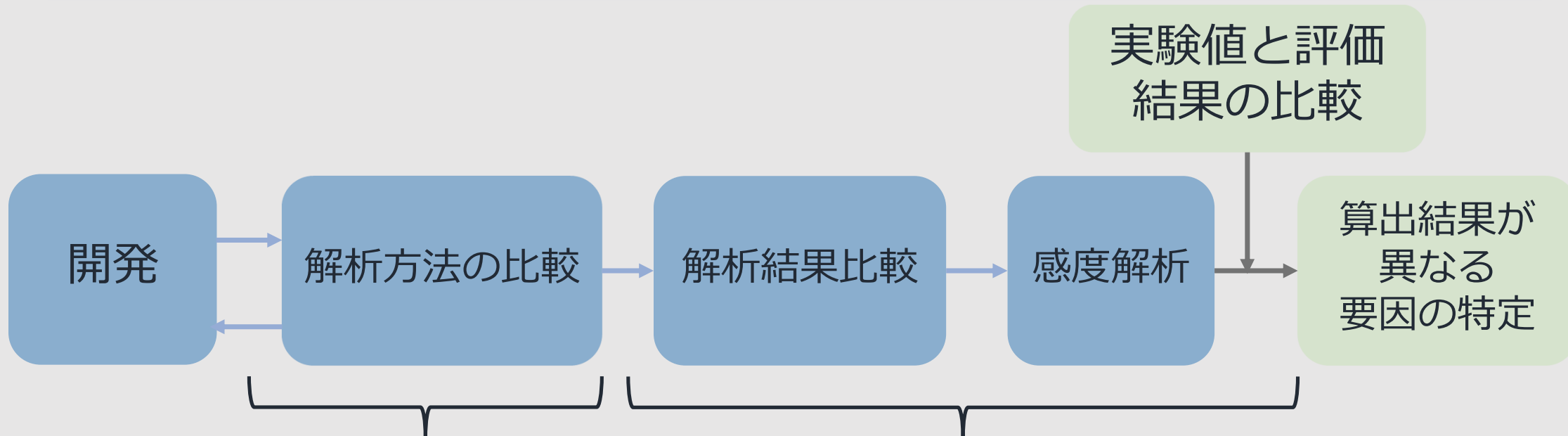


• **意思決定**  
(decision-making)



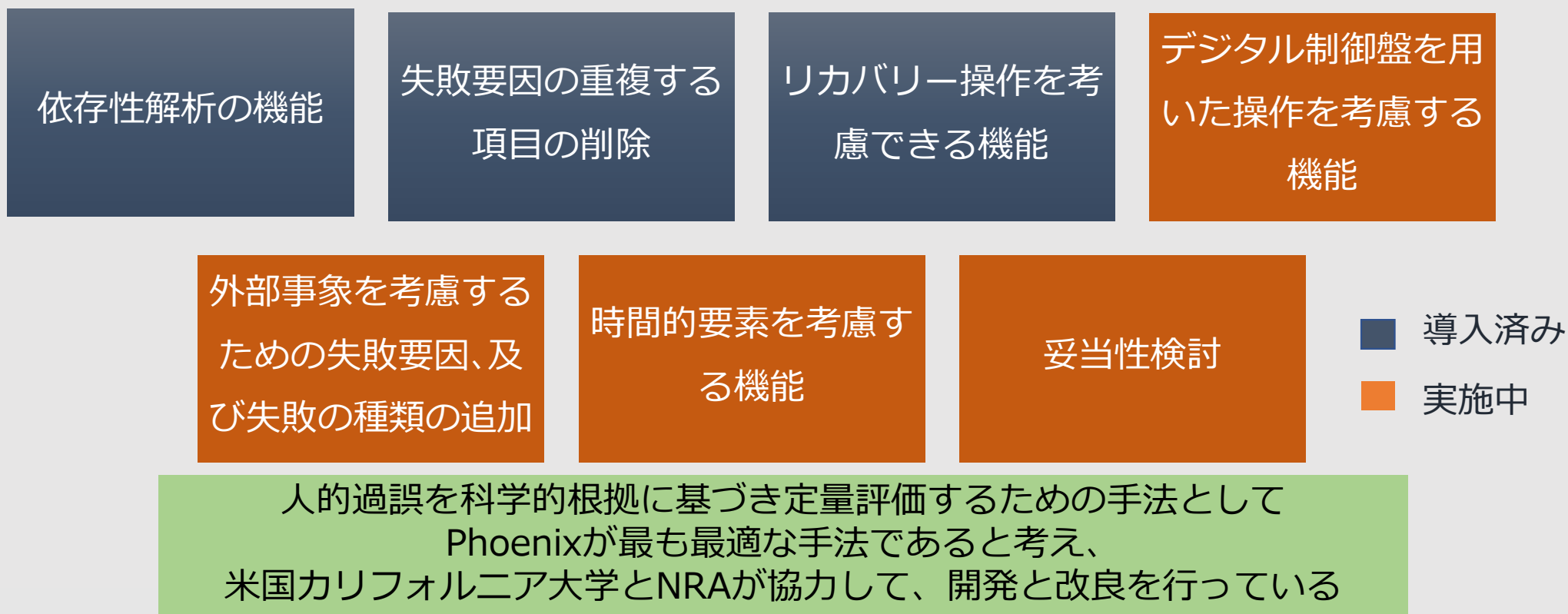
• **操作**  
(Action)

## 2-3. 研究計画

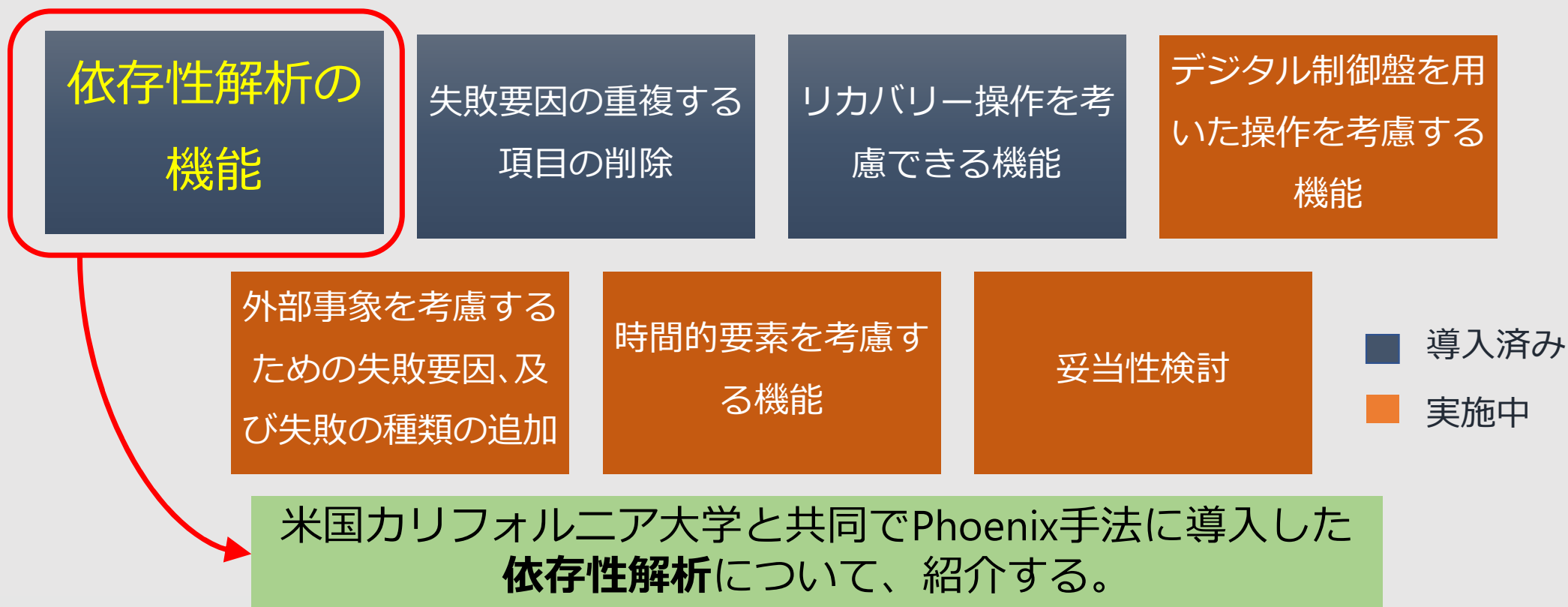


- ・ 操作失敗の分析方法の違いは？
- ・ 異なる解析条件の結果への影響度は？
- ・ どこまで解析条件を合わせられる？
- ・ 実験データと同じ傾向を示す？

## 2-4. NRAにおけるPhoenixの開発・改良



## 2-4. NRAにおけるPhoenixの開発・改良





## 2-5. SPAR-Hの失敗要因考慮方法

### 人的過誤の種類



・ 診断  
(Diagnosis)

設定値=1E-02



・ 操作  
(Action)

設定値=1E-03

### 失敗要因

設定不可  
+  
4 ~ 5 段階評価

人間工学/ユーザー  
インターフェース

手順書

余裕時間

操作の複雑さ

手順

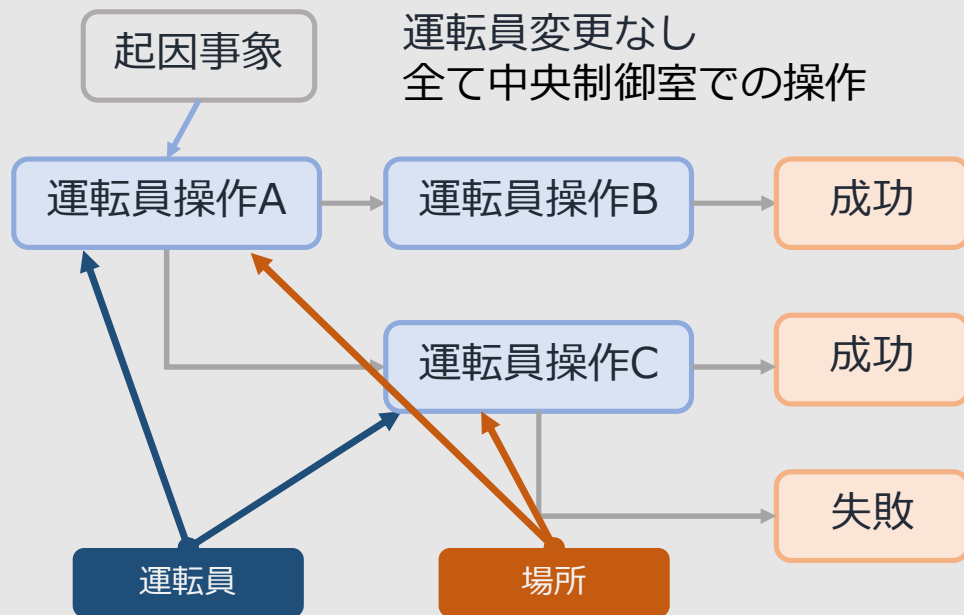
ストレス

経験/訓練

身体的・精神的状態

失敗要因を考慮した人的過誤確率 =  
設定値 x 失敗要因の影響度の積

## 2-6. SPAR-Hで考慮する依存要因と依存度決定方法



- ・ 失敗の依存性のみ考慮
- ・ 依存度は工学的判断に基づく5段階評価
- ・ 依存を考慮すると人的過誤確率は変化なしor上昇

Dependency Condition Table						
Condition Number	Crew (same or different)	Time (close in time or not close in time)	Location (same or different)	Cues (additional or no additional)	Dependency	Number of Human Action Failures Rule □ - Not Applicable. Why? _____
1	s	c	s	na	complete	When considering recovery in a series e.g., 2 <sup>nd</sup> , 3 <sup>rd</sup> , or 4 <sup>th</sup> checker
2	s	c	s	a	complete	
3	s	c	d	na	high	
4	s	c	d	a	high	
5	s	nc	s	na	high	If this error is the 3 <sup>rd</sup> error in the sequence, then the dependency is at least moderate.
6	s	nc	s	a	moderate	
7	s	nc	d	na	moderate	
8	s	nc	d	a	low	
9	d	c	s	na	moderate	If this error is the 4 <sup>th</sup> error in the sequence, then the dependency is at least high.
10	d	c	s	a	moderate	
11	d	c	d	na	moderate	
12	d	c	d	a	moderate	
13	d	nc	s	na	low	
14	d	nc	s	a	low	
15	d	nc	d	na	low	
16	d	nc	d	a	low	
17					zero	

Using  $P_{w/od}$  = Probability of Task Failure Without Formal Dependence (calculated in Part III):

For Complete Dependence the probability of failure is 1

For High Dependence the probability of failure is  $(1 + P_{w/od})/2$

For Moderate Dependence the probability of failure is  $(1 + 6 \times P_{w/od})/7$

For Low Dependence the probability of failure is  $(1 + 19 \times P_{w/od})/20$

For Zero Dependence the probability of failure is  $P_{w/od}$

引用: Gertman, D.I *et al.* "The SPAR H human reliability analysis method.; Human Factors, Robotic, and Remote Systems," Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, Idaho Falls, United States, pp. 17-24 (2004).

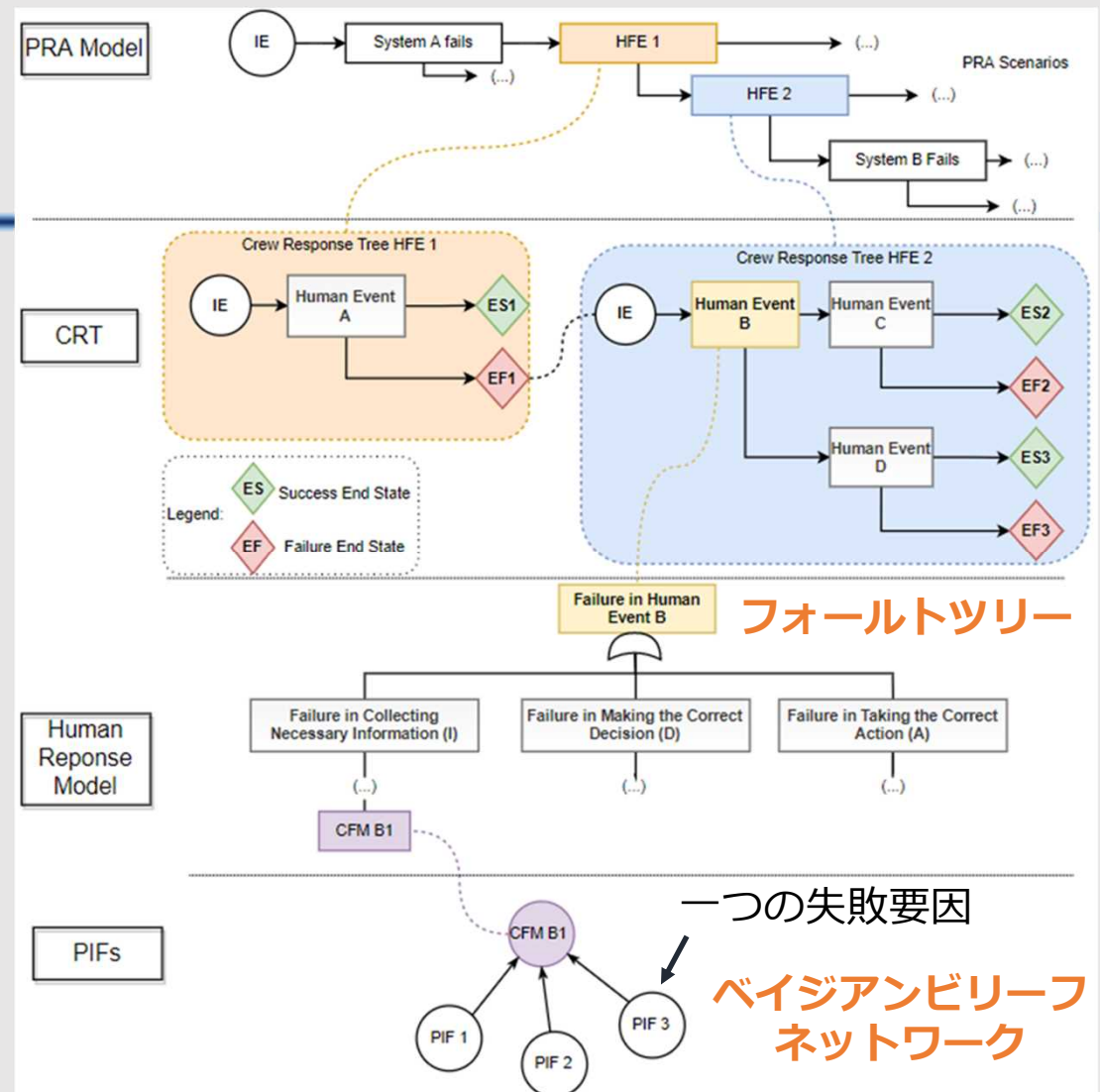
## 2-7. Phoenix手法の解析手順

1. 事象進展整理

2. 行動の抽出

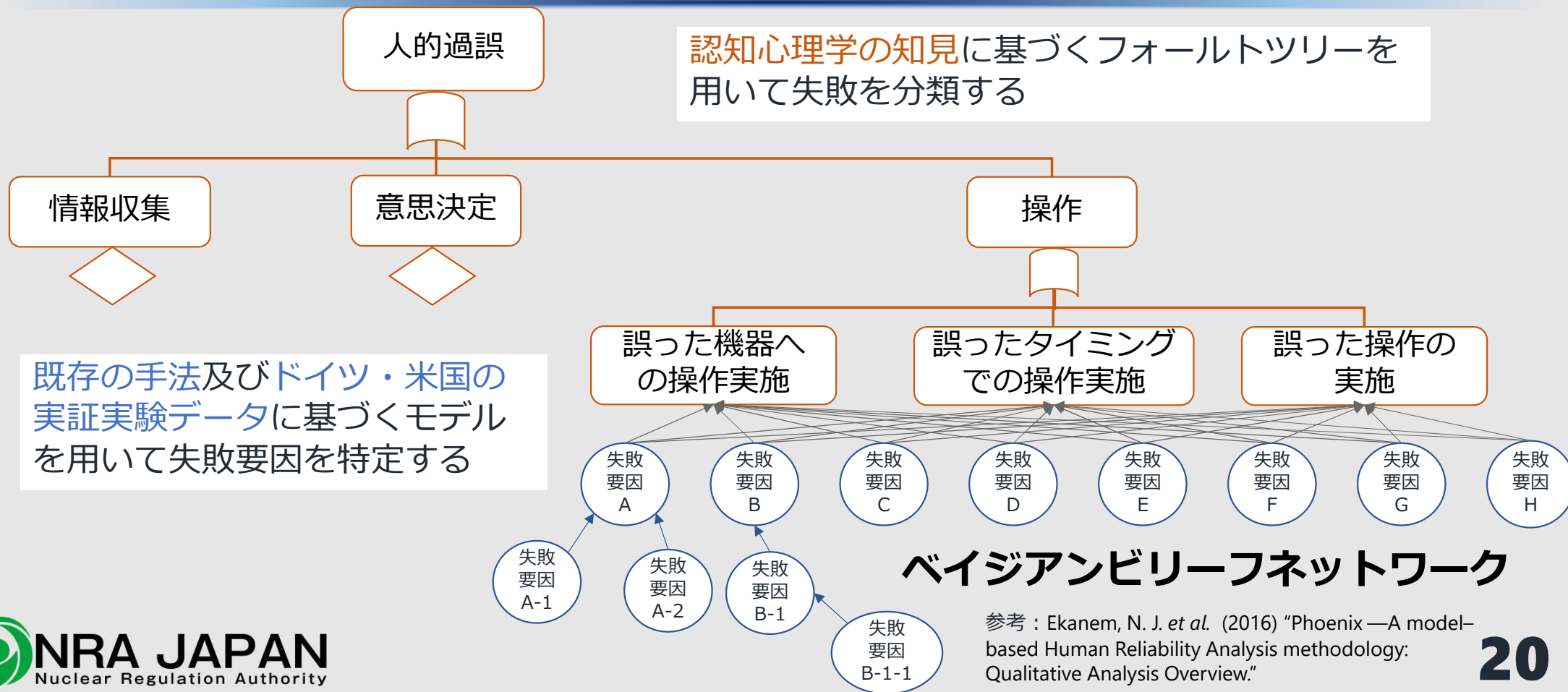
3. 失敗の種類を特定

4. 失敗要因の特定

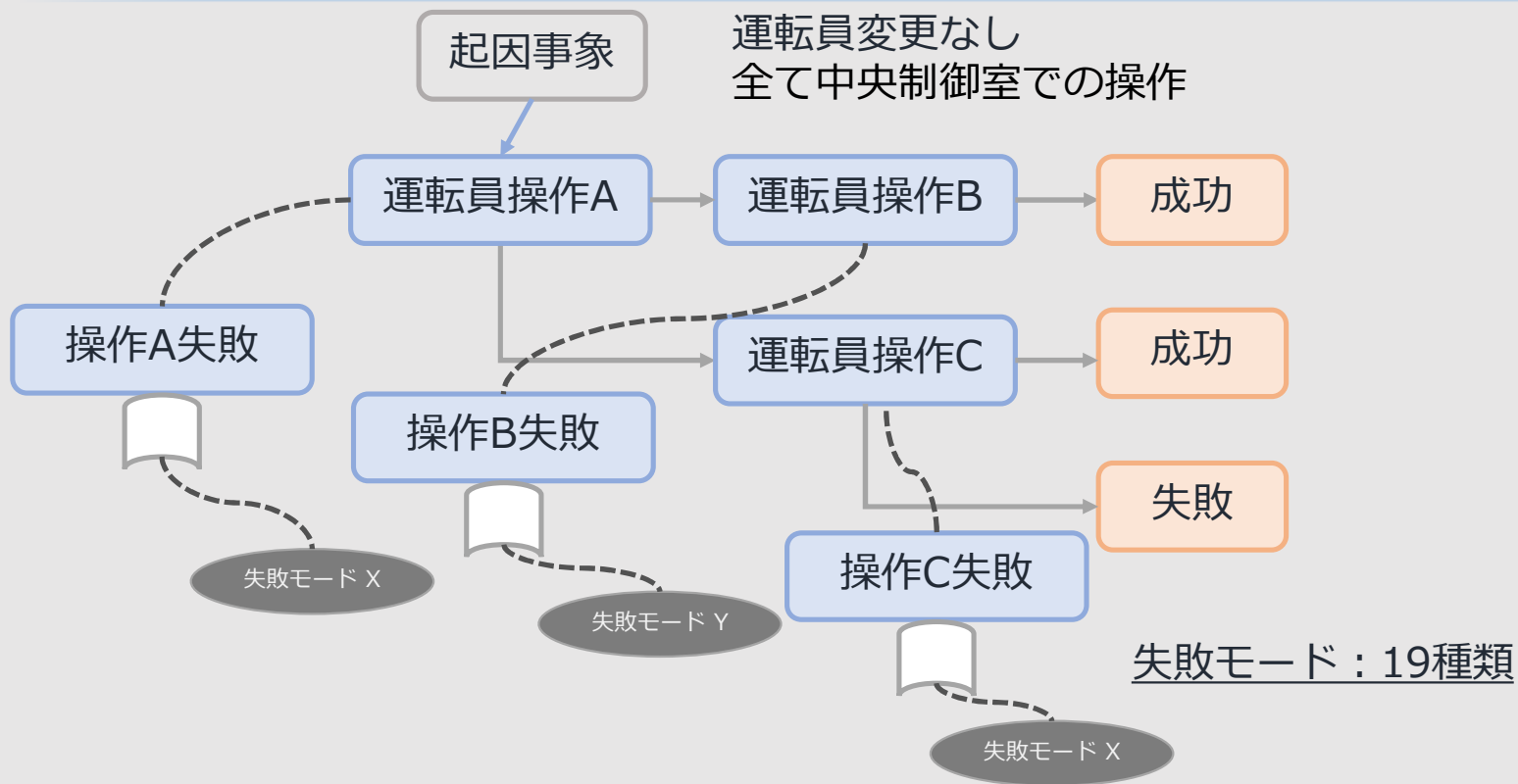


出典 : Ramos, M et al. (2021) "Phoenix Human Reliability Analysis Method: Application to a Feed and Bleed Operation", PSAM2021 proceedings

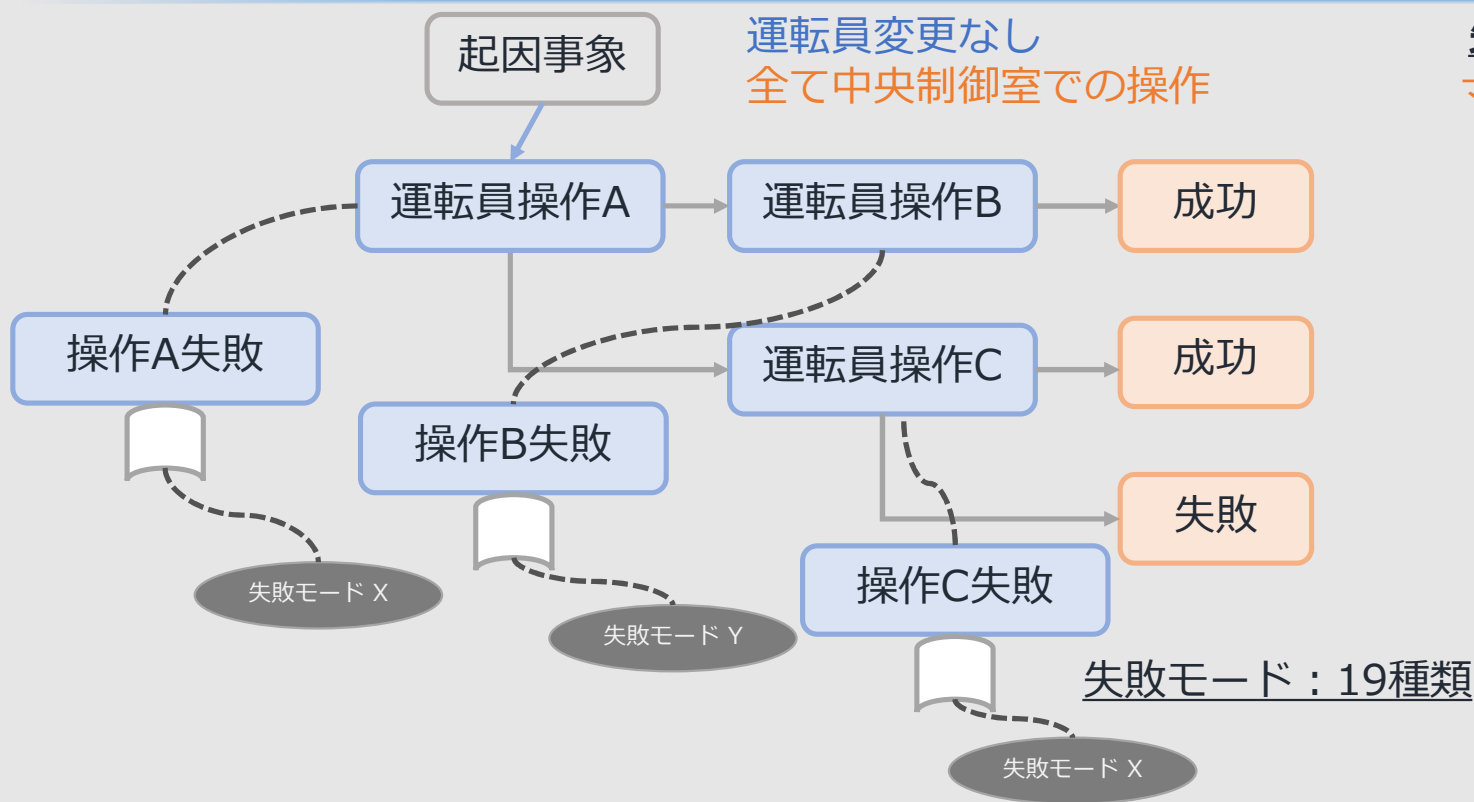
## 2-8. Phoenixにおける失敗モードと失敗要因の分類



## 2-9. Phoenixで考慮する依存要素と依存度決定方法



## 2-9. Phoenixで考慮する依存要素と依存度決定方法



**失敗要因 = 依存要素：8種類**  
マンマシンインターフェース

手順書

ストレス

作業負荷

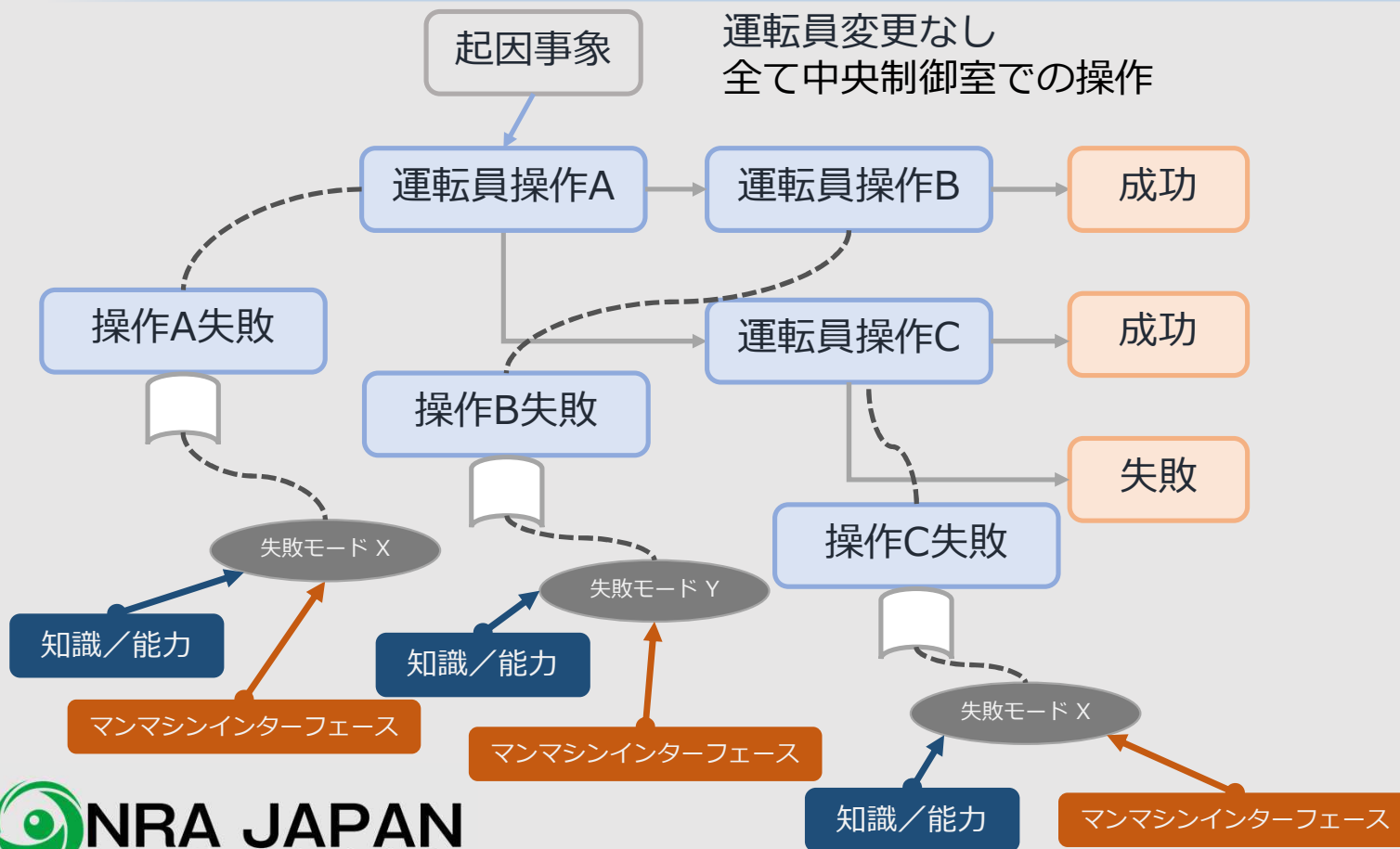
知識／能力

バイアス  
(先入観や偏見)

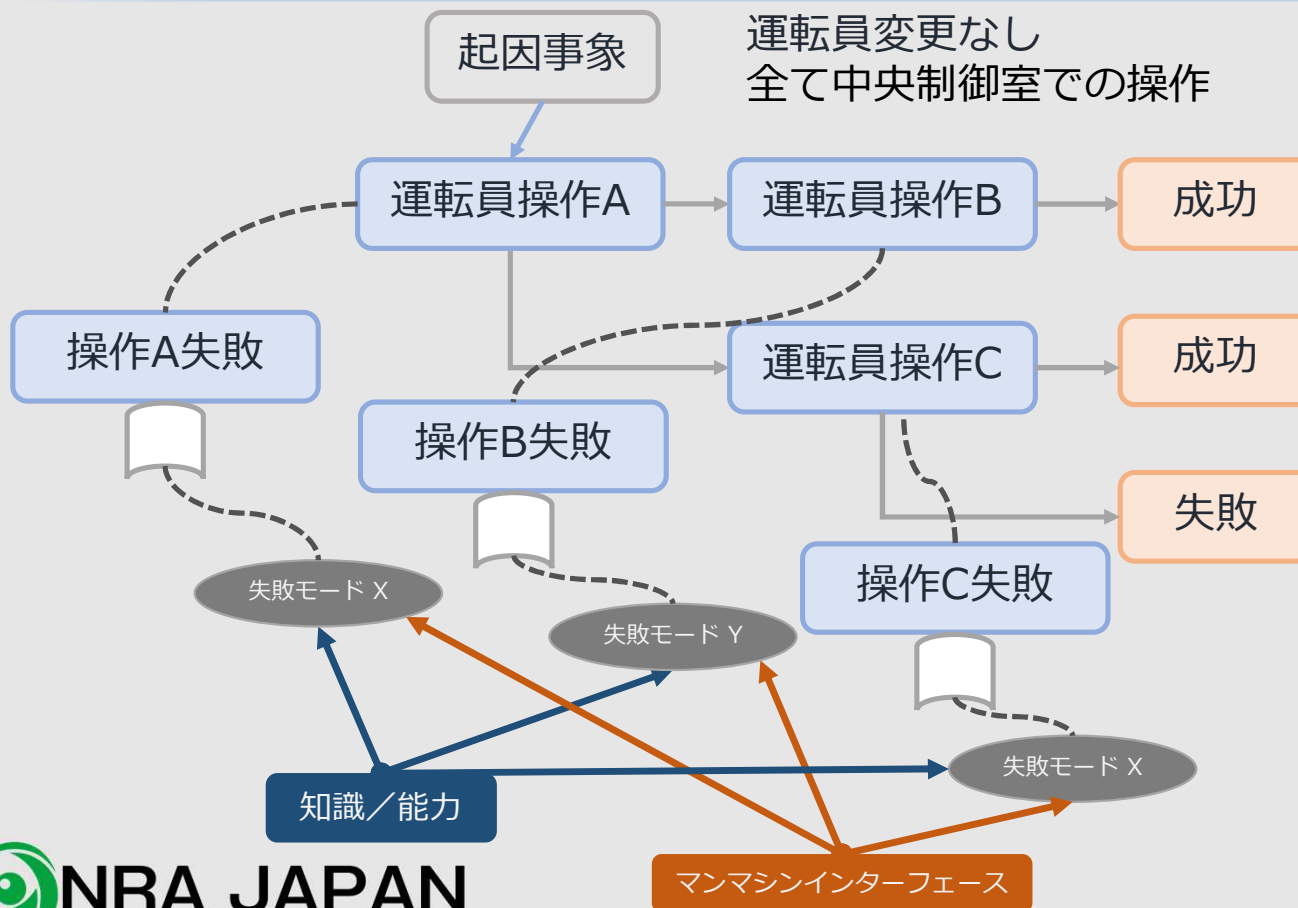
リソース  
(利用可能な資源)

チーム効果・効率性

## 2-9. Phoenixで考慮する依存要素と依存度決定方法



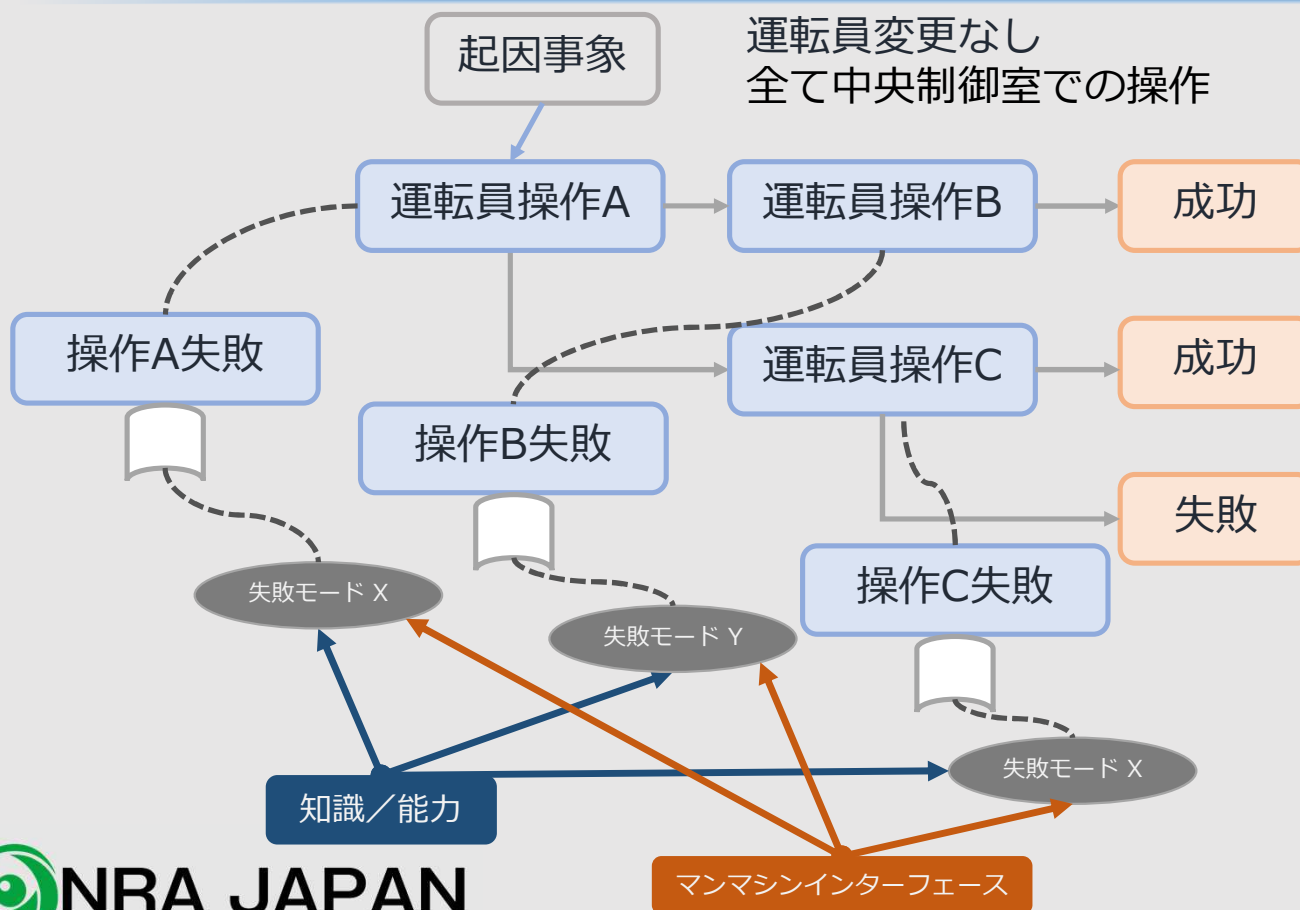
## 2-9. Phoenixで考慮する依存要素と依存度決定方法



- ① 共通する失敗要因をグループ化
- ② 事象進展に伴い失敗モードの状態を変更し、依存要素の確率を変更



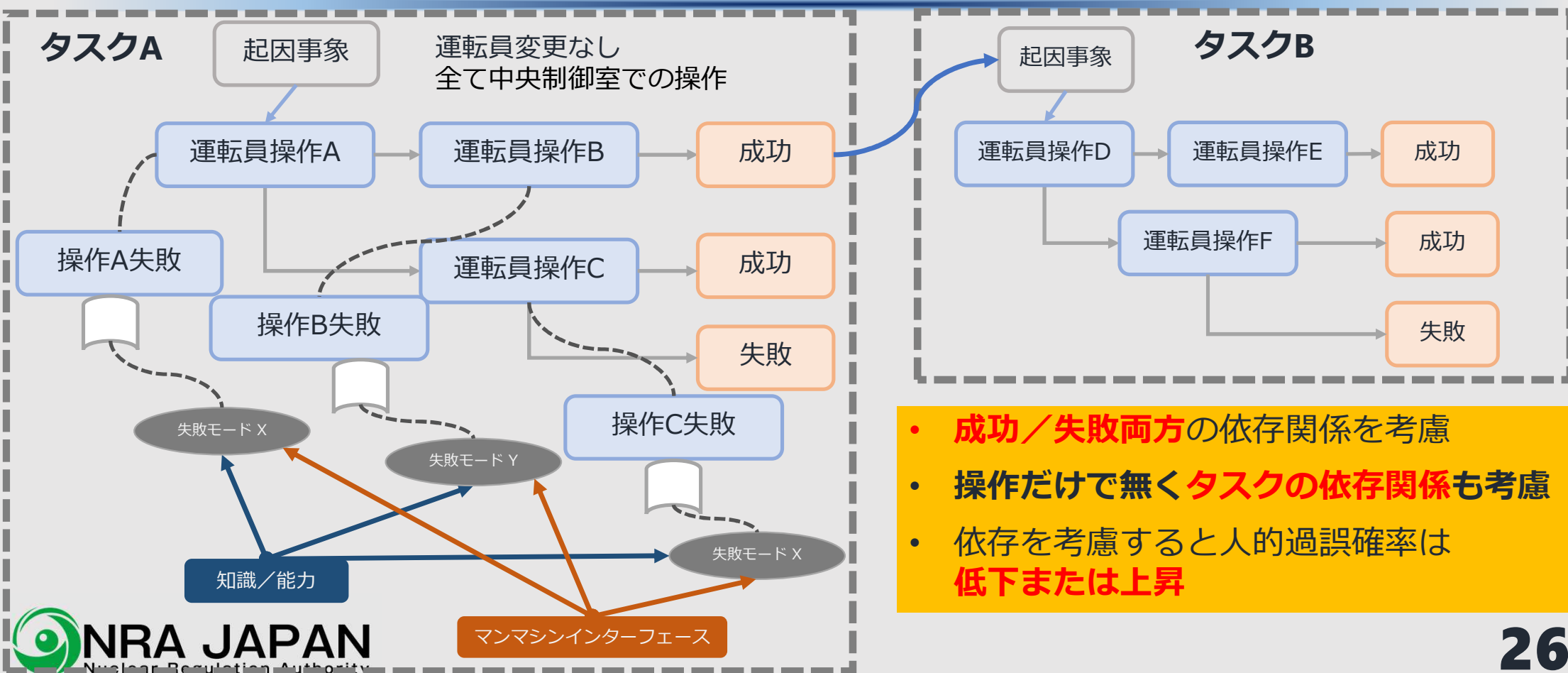
## 2-9. Phoenixで考慮する依存要素と依存度決定方法



- ① 共通する失敗要因をグループ化
- ② 事象進展に伴い失敗モードの状態を変更し、依存要素の確率を変更

- 依存関係の組み合わせは自由  
(9728通り= $2^{8+1} \times 19$ )

## 2-9. Phoenixで考慮する依存要素と依存度決定方法



## 2-10. 定量評価結果：方法

SPAR-HとPhoenixの  
人的過誤確率の比較



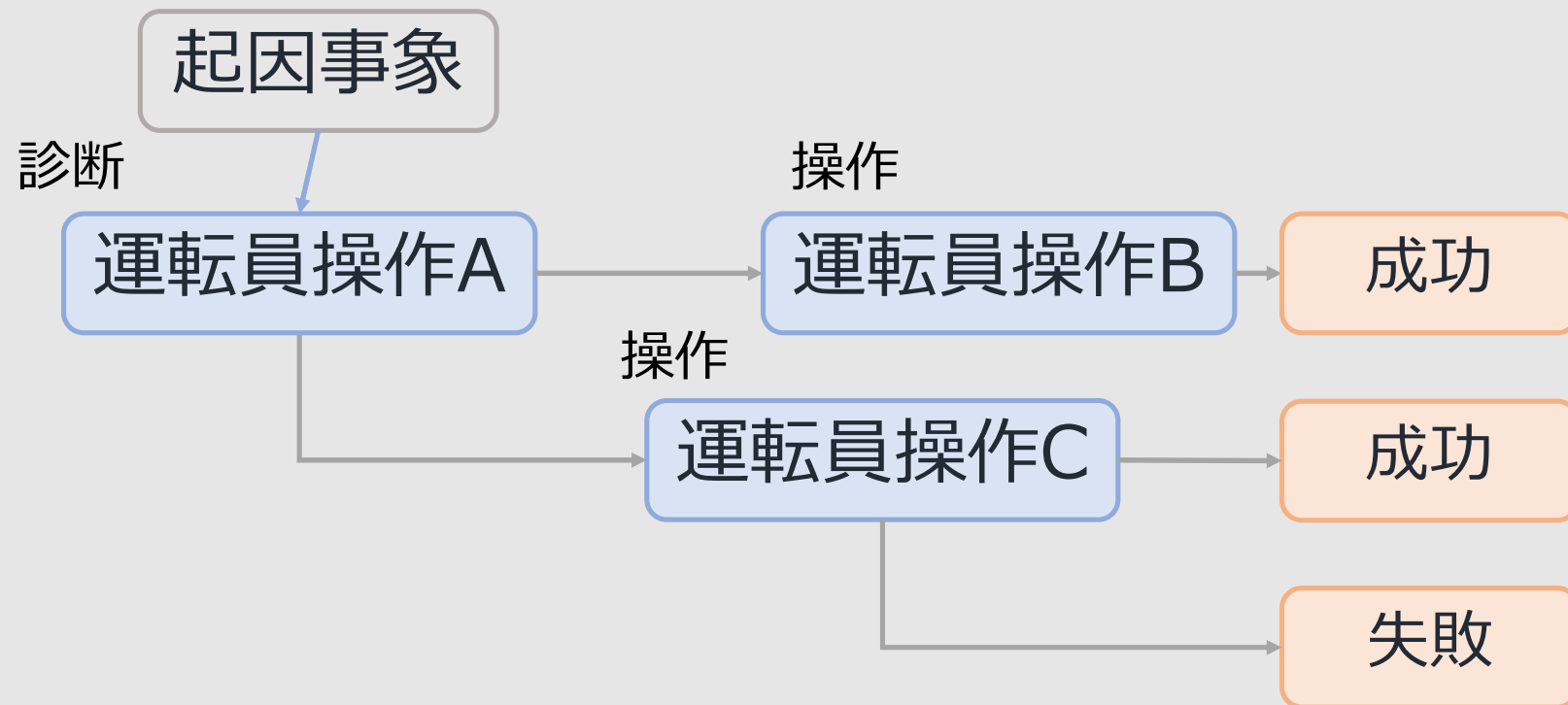
Phoenix特有の  
タスク間の依存関係を  
考慮した試解析



違いが生じた要因分析

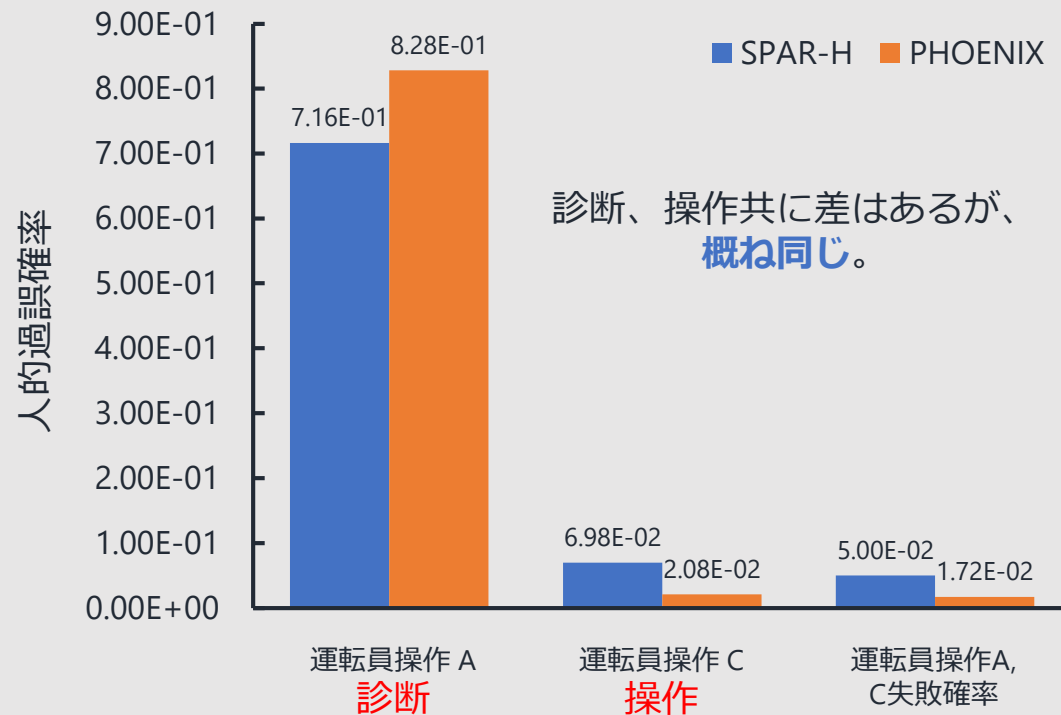
失敗要因及び依存要因の  
解析条件はSPAR-Hと  
Phoenixで合わせた

## 2-11. 従来手法との定量評価結果の違い：対象シナリオ

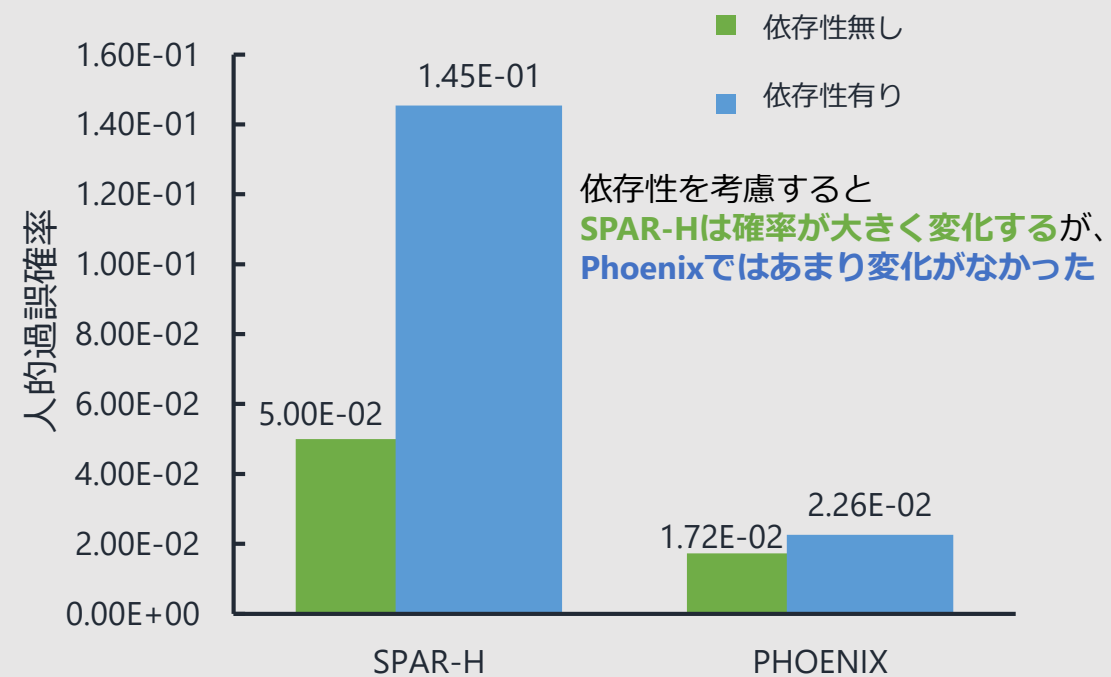


## 2-11. 従来手法との定量評価結果の違い

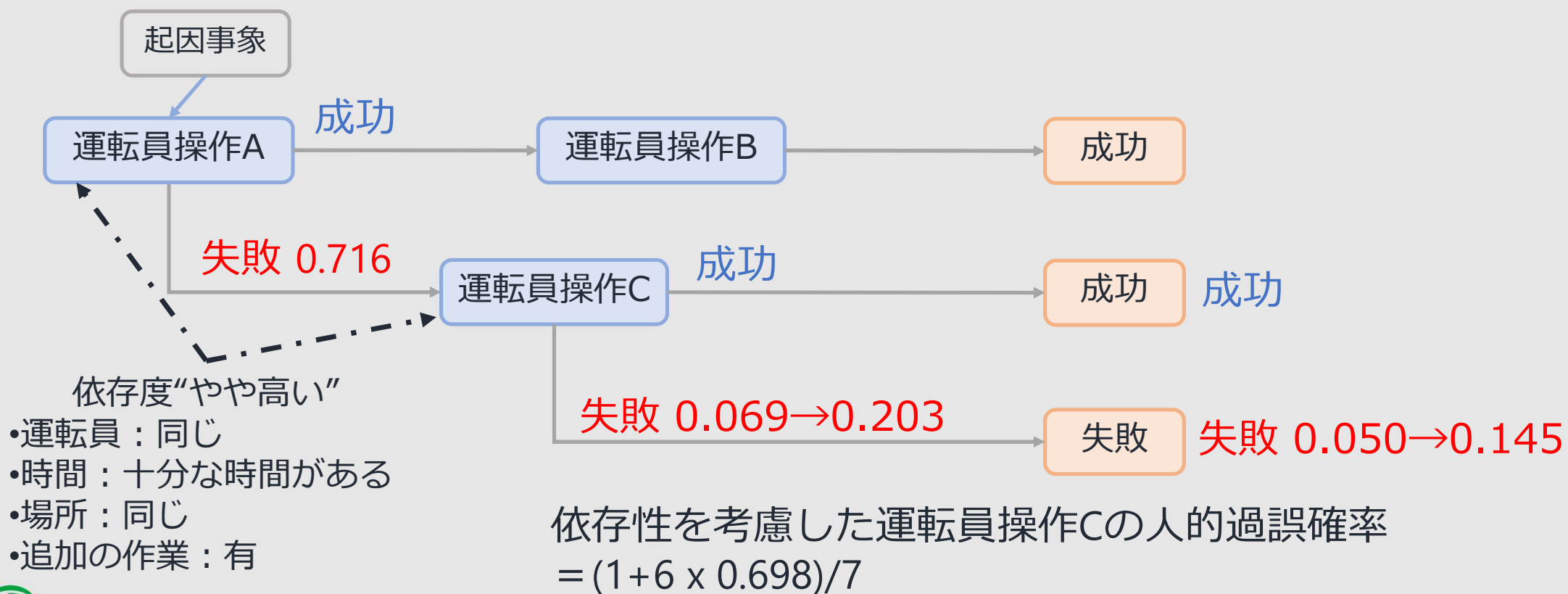
依存性を考慮しない人的過誤確率



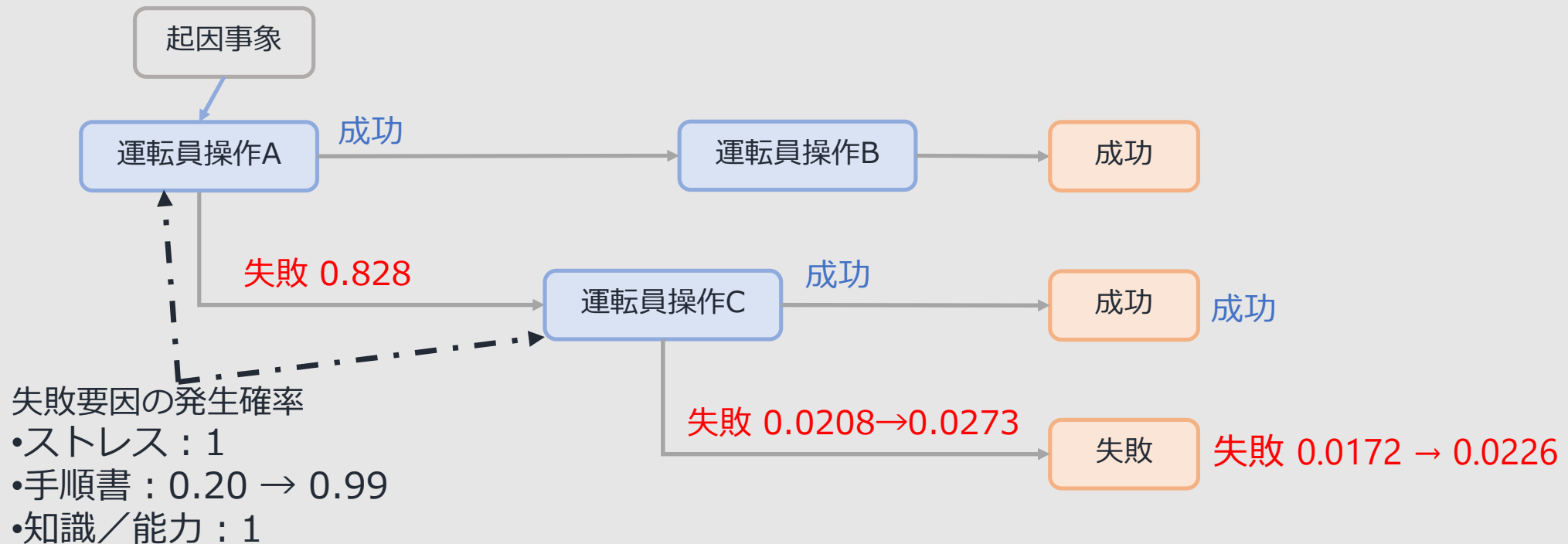
依存性考慮による人的過誤確率の変化



## 2-11. 定量評価結果：SPAR-H



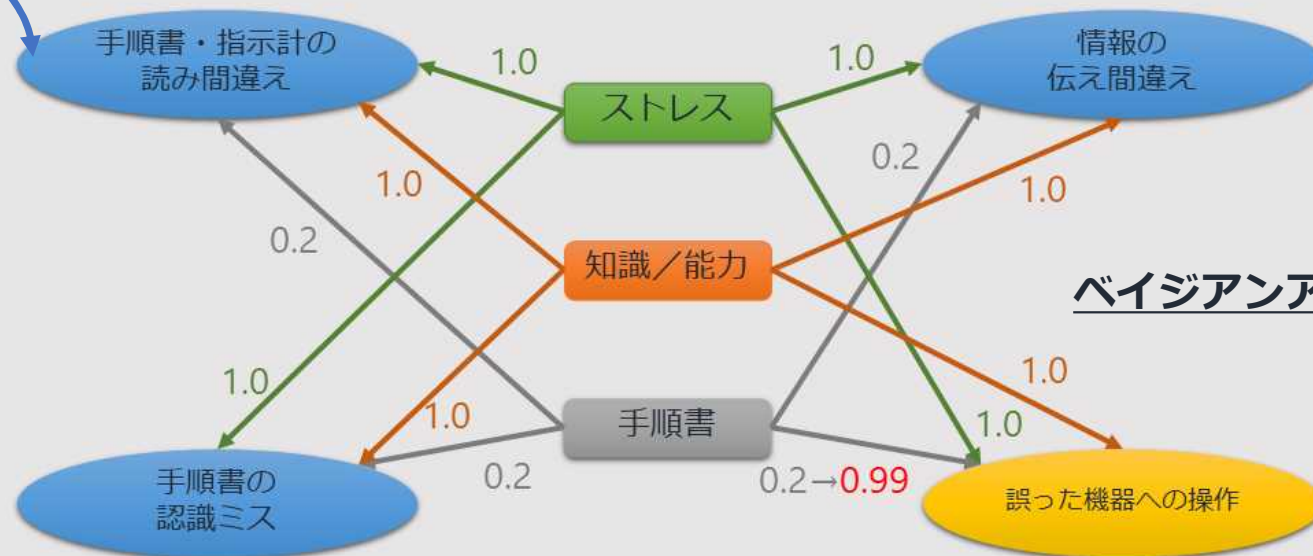
## 2-11. 定量評価結果：Phoenix



## 2-11. Phoenixの依存性を考えることによる 失敗要因の発生確率の変化



依存性を考慮すると、運転員操作Aは絶対に失敗する。  
→操作Cへの失敗要因の発生確率が高くなる

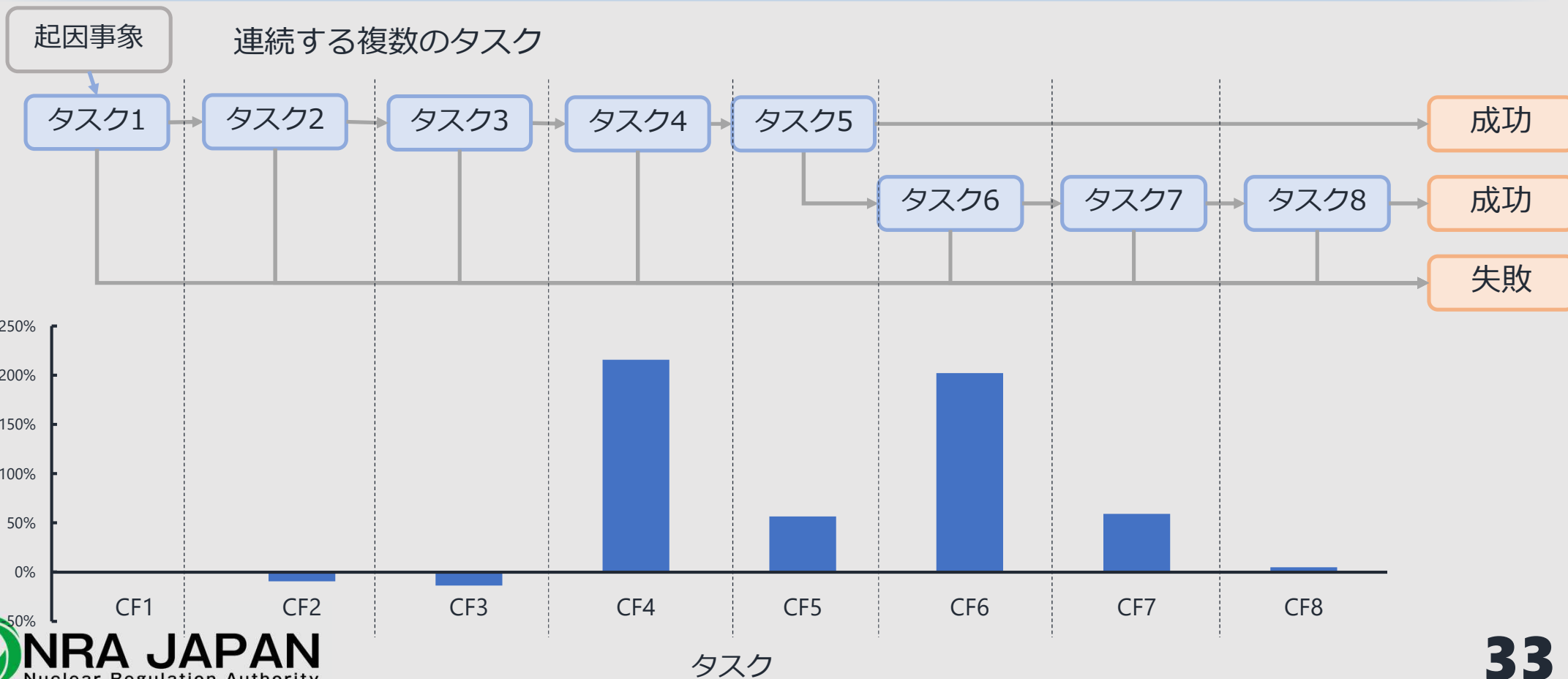


ベイジアンアップデート

- 運転員操作Aの失敗モード
- 運転員操作Cの失敗モード
- 失敗要因

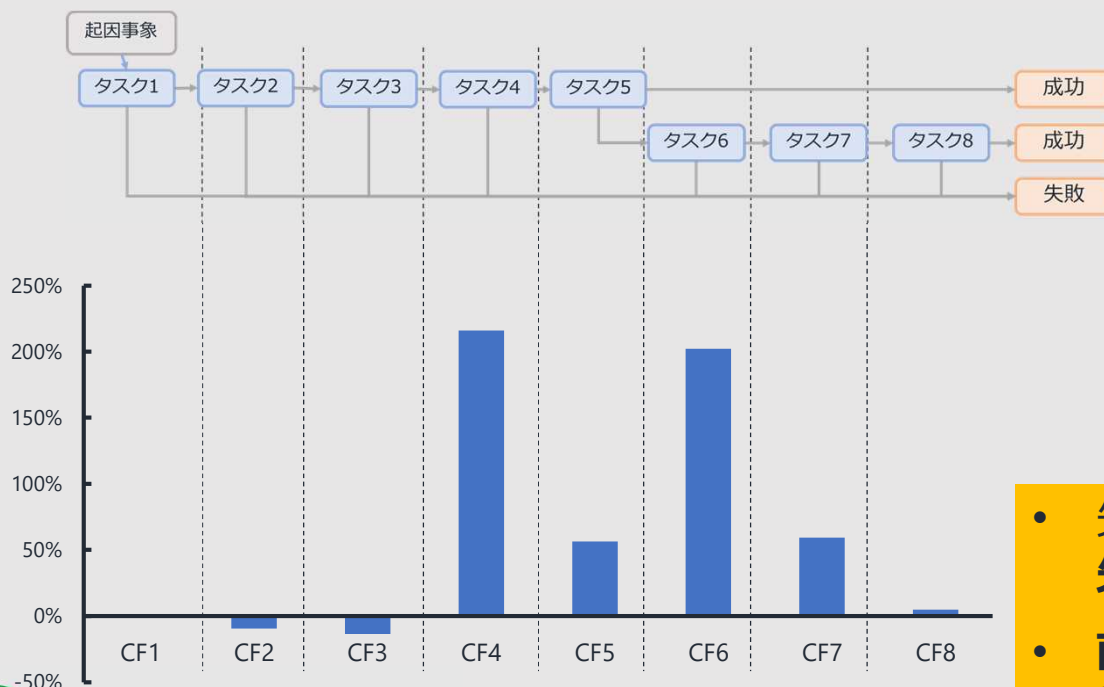


## 2-12. Phoenixにおけるタスク間の依存性解析

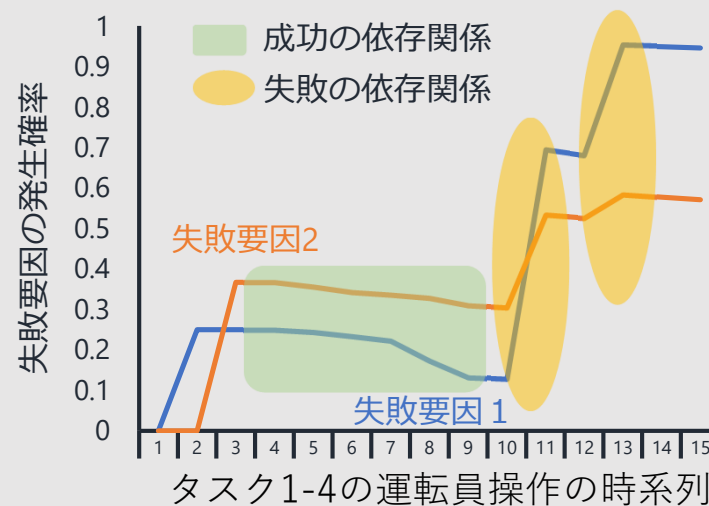


# 2-12. Phoenixにおける 依存性解析での人的過誤確率の変化

依存性考慮による人的過誤確率の変化



失敗要因の発生確率の変化



- 失敗／成功の依存関係により  
失敗要因の発生確率が変化する (ベイズ更新)
- 前のタスクの成功／失敗確率は次のタスクに引き継がれる

## 2-13. まとめ：課題と新手法Phoenixの開発

リスクの観点から、人的過誤は炉心損傷への寄与も大きいことが知られているため、他の手法と比較しながら、不確かさを低減した評価の方法を開発している。



### 最新手法の開発・改良

- 既存手法の課題を解決したモデルベースの新手法Phoenixを米国カリフォルニア大学と共に開発・改良を進めている

### 解析手法の比較の視点

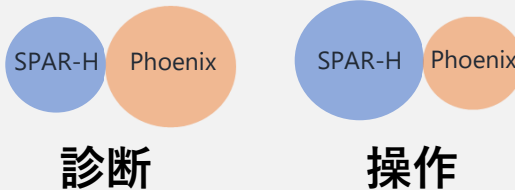
- 人的過誤の種類
- 依存性解析
  - 失敗のみ or 成功／失敗両方
  - 操作間の依存性のみ or 操作間／タスク間両方
  - 工学的判断ベース or 科学的知見に基づくモデルベース

→依存性解析方法の違いに注目し、解析結果を比較した

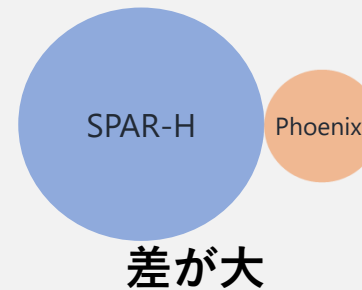
## 2-13. まとめ：定量結果比較

### 操作間の 依存性

#### ・ 人的過誤確率の比較



#### ・ 依存を考慮した変化率



- ・ 人的過誤の分類
- ・ 失敗要因の影響度
- ・ 成功／失敗両方
- ・ 科学的知見に基づくモデルベース

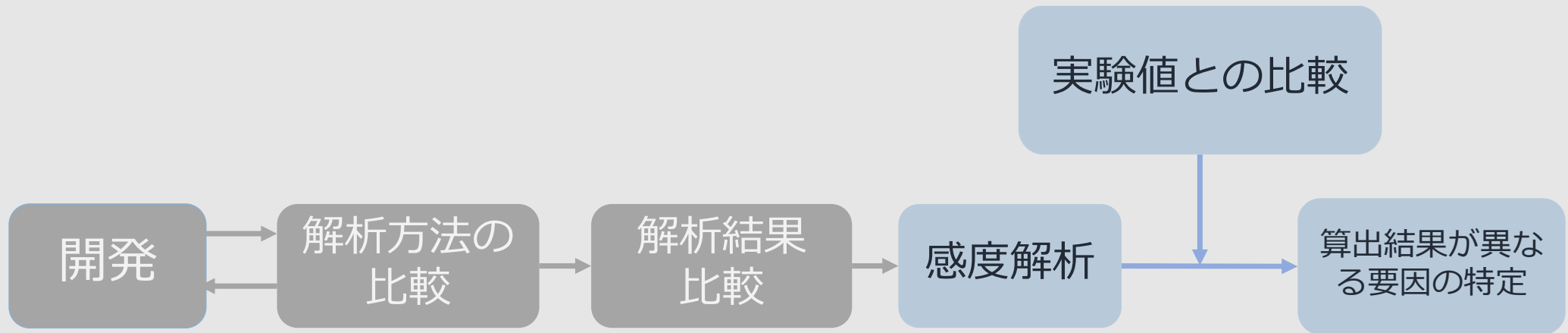
Phoenixの強みは、科学的根拠に基づく依存性解析だけではない。

### Phoenixの強 み：タスク間 の依存性

- ・ 前のタスクの**成功／失敗の条件**を次のタスクの**成功／失敗確率の計算に引き継ぐ**ことで依存性が考慮されている。

### 3. 将来の展望

ハルデンでの実証データの取得  
→Phoenixのデータベース更新  
→実証データと解析結果の比較



# 参考文献

1. Trager, T.A., Jr. , Case Study Report on Loss of Safety System Function Events, Report No.AEOD/C 504, United States Nuclear Regulatory Commission (NRC), Washington, DC, 1985.
2. Heo, G., Park, J., A framework for evaluating the effects of maintenance-related human errors in nuclear power plants, *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 95, pp. 797–805, 2010.
3. Lee, J.W., Park, G.O., Park, J.C., Sim, B.S., Analysis of error trips cases in Korean NPPs, *Journal of Korean Nuclear Society*, Vol. 28, pp. 563–575, 1996.
4. International Atomic Energy Agency. Technical support for nuclear power operations. Vienna, 1999
5. Gertman, D.I., Blackman, H.S., Marble, J.L., Smith, C., Boring, R.L., O'Reilly, P. "The SPAR H human reliability analysis method.; Human Factors, Robotic, and Remote Systems," Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, Idaho Falls, United States, pp. 17–24, NUREG-6883, 2004
6. Ekanem, N. J. *et al.* "Phoenix —A model-based Human Reliability Analysis methodology: Qualitative Analysis Overview.", *Reliability Engineering and System Safety* 145, pp. 301-315, 2016
7. Ramos, M et al. "Phoenix Human Reliability Analysis Method: Application to a Feed and Bleed Operation", PSA2021 proceedings, virtual meeting, 2021